

Numero d'ordre : 3181

THÈSE

PRÉSENTÉE À

L'UNIVERSITÉ BORDEAUX I

ÉCOLE DOCTORALE DES SCIENCES PHYSIQUES ET DE
L'INGÉNIEUR

par **Aurélie LE DISSEZ**

POUR OBTENIR LE GRADE DE

DOCTEUR

SPÉCIALITÉ : Mécanique

**MODÉLISATION NUMÉRIQUE DES
ÉCOULEMENTS TIDAUX EN MILIEUX PEU
PROFONDS.
APPLICATION À L'ÉTUDE DE
L'HYDRODYNAMIQUE DU BASSIN D'ARCACHON.**

SOUTENUE LE : 21 juin 2006

APRÈS AVIS DE :

MM. D. K. NGUYEN, Professeur, Université de Caen
P. ANGOT, Professeur, Université d'Aix-Marseille

Rapporteur
Rapporteur

DEVANT LA COMMISSION D'EXAMEN FORMÉE DE :

MM. P. ANGOT, Professeur, Université d'Aix-Marseille
P. BERTRAND, Directeur de Recherche, DGO, Bordeaux1
J. P. CALTAGIRONE, Professeur, TREFLE, Bordeaux1
D. K. NGUYEN, Professeur, Université de Caen
A. SOTTOLICHIO, Maître de Conférences, DGO, Bordeaux1

Examineur
Président
Examineur
Examineur
Rapporteur

Remerciements

Avant de tourner la page de mes années de thèse enfin concrétisées par ce mémoire, j'ai très envie de m'adonner à l'exercice ultime - et sincère - des remerciements.

Parce que cela signe le travail achevé (car oui il faut bien une fin...), et puis car beaucoup d'entre vous ont contribué à l'apposition du point final sans trop de douleur, voire dans le plaisir, et que je vous en suis profondément reconnaissante.

Donc Jean-Paul, merci pour la rencontre que tu m'as permise de faire avec le monde étrange et pénétrant du numérique et, plus intimement encore, des entrailles d'Aquilon.

Aldo, merci d'avoir su m'en extirper par des discussions bel et bien géophysiques et quelques sorties de terrain au grand air iodé et chargé d'embruns marins revigorants.

Surtout, merci à tous les deux de m'avoir confié ce sujet aussi transversal que motivant.

Et merci infiniment à Martin Plus, d'IFREMER - Arcachon, pour sa contribution majeure dans la validation du modèle sur le Bassin.

Je remercie également Messieurs Nguyen et Angot pour avoir accepté de rapporter mon travail et pour les discussions occasionnées indéniablement constructives et enrichissantes. Merci à Mr Philippe Bertrand de m'avoir fait l'honneur de présider le jury.

Et puis un grand merci aux pensionnaires du Treffe :

Eric, pour son accueil prolongé et son soutien réel,

Mejdi, gourou de l'équipe MFEN, qui a veillé discrètement au bon déroulement des choses...,

Stéphane G., pour le don qu'il fait de son temps, sa patiente gentillesse et l'ambiance jazzy qui habite son bureau,

Stéphane V., toujours enthousiaste pour une nouvelle aventure aquilonnienne, jamais à court de blagues toujours légères,

Jean, qui a su mettre des oeillères et ne point -trop- voir le chaos bureaucratique voisin de son propre environnement de travail, Guillaume qui réfléchit décidément plus vite que son ombre, David sans qui l'univers de la direction assistée hydraulique d'une XM me serait, à ce jour, encore bien mystérieux, Bernard, dresseur de Condor rien de moins, Marie-Paule qui simplifie les démarches compliquées, traque mes fautes d'orthographe et apporte les colis vecteurs de bonne humeur pour la journée,

Cédric, pour nos debriefings toujours concordants et salvateurs, n'est-ce pas?,

Les anciens thésards, partis loin, Claude, Greg et Bobo, la grande époque...

Mr Pierre, forcément, pour tant de choses: sa force tranquille, ses encouragements, ses private jokes toujours plus trash et idéales pour agrémenter 12h d'avion sans télé...

Dr Sous, pour nos collaborations fructueuses...

Delphine, auprès de qui j'ai puisé tant d'énergie pour aller de l'avant, c'est si précieux! tout comme nos moments purement "filles" finalement!

Enfin, Nirina, Nicolas, Christophe, Stéphanie... on l'a fait, voyez!
Et les jeunôts : Aurélie, Mathilde, Erwann, Etienne, Sylvain, Hamza, Jérôme, Arthur, Matthieu a qui je passe le relai...leur souhaitant plein de courage et de succès bien entendu!

Loin du Trefle, de l'autre côté du jardin public, je pense fort à Mister Bru et Madame Cé, les hôtes de nombreuses soirées-concept ressourçantes, bienfaitantes et jubilatoires, savante alliance de houblon, de yoga, de verdure, de philo et de fous rires... Cela me manque déjà! Vivement le prochain crépuscule à la villa Margalèse! Et merci encore pour tout.

Voici le tour de Mr DAAAM, merci - entre autres - pour ces évasions exotiques aux pays des vortex (je maîtrise maintenant), des tubes et des "pures sessions", des orange mécanique, des fish, des ... et tant d'autres ailleurs encore! et puis, enfin tu sais...

Pour finir, j'embrasse très, très fort mes parents et ma soeur, si précieux, si présents quand il faut, si importants dans cette entreprise comme pour

tout. Merci pour votre sagesse, vos attentions répétées, votre patience, votre confiance et toutes vos valeurs! Je vous l'annonce : c'est fini! Vous pouvez respirer jusqu'au prochain défi!

Voilà, maintenant le bassin vous attend! Enjoy it...

*A mes parents,
A ma sœur*

Sommaire

Introduction Générale	3
1 La modélisation numérique de l'hydrodynamique côtière	7
1.1 Problématique générale	8
1.1.1 L'étude des lagunes tidales très peu profondes	11
1.1.2 Les différentes méthodes d'étude des écoulements tidaux en milieux très peu profonds	13
1.1.3 Le choix de l'outil numérique	16
1.2 Les modèles physiques.	18
1.2.1 Les équations de Saint-Venant	18
1.2.2 Hypothèses et domaine de validité	19
1.3 Les méthodes numériques	22
1.3.1 Les difficultés propres à la modélisation numérique de l'hydrodynamique littorale	22
1.3.2 Objectifs	27
1.3.3 Les différentes méthodes existantes	27
1.3.4 Synthèse	32
1.4 Exemples d'application de codes 2DH à l'étude de sites côtiers naturels. . .	35
1.4.1 La Baie de Morecambe	35
1.4.2 La Baie de San Francisco	37
1.4.3 La Baie du Mont-Saint-Michel	39
1.4.4 Les modèles 2DH du Bassin d'Arcachon.	41
1.5 Conclusion du chapitre	42
2 Nouveau modèle numérique pour l'hydrodynamique côtière	43
2.1 Le modèle physique	45

2.1.1	Les équations de Navier-Stokes	45
2.1.2	Introduction d'un terme de Darcy dans les équations de Navier-Stokes	46
2.1.3	Nouveau système des équations en eau peu profonde	47
2.2	Le code AQUILON	49
2.2.1	Présentation générale	49
2.2.2	Compétences	49
2.3	Approximation numérique du modèle	50
2.3.1	Les schémas de discrétisation	50
2.3.2	Résolution du couplage vitesse-hauteur	52
2.4	Méthode de pénalisation pour les zones intertidales	60
2.4.1	Les zones intertidales	60
2.4.2	Méthode de pénalisation	62
2.4.3	Fonction de phase	62
2.4.4	Calcul de la ligne d'eau	64
2.5	Conclusion du chapitre	66
3	Validation sur des cas tests théoriques	67
3.1	Bathymétrie irrégulière	67
3.1.1	Description	68
3.1.2	Résultats	70
3.2	Zones intertidales	72
3.2.1	Plage plane	72
3.2.2	Bassin avec réservoir	77
3.3	Ressaut hydraulique	83
3.3.1	Parabole de révolution	88
3.4	Bore sur plage inclinée	92
3.4.1	Propagation du bore	92
3.4.2	Bore run-up	94
3.5	Couche de mélange turbulente	97
3.6	Conclusion du chapitre	100
4	Application à l'étude de l'hydrodynamique d'une lagune à bathymétrie complexe : le Bassin d'Arcachon	101
4.1	Présentation du bassin d'Arcachon	104
4.1.1	Un système lagunaire à la morphologie complexe	105

4.1.2	Les agents dynamiques : observations <i>in-situ</i>	109
4.1.3	Hydrologie du bassin	112
4.1.4	Unités et mouvements sédimentaires : observations <i>in-situ</i>	112
4.1.5	Synthèse	113
4.2	Les paramètres de simulation de l'hydrodynamique du Bassin sous l'action de la marée	114
4.2.1	Emprise du modèle, bathymétrie	114
4.2.2	Discrétisations spatiale et temporelle	117
4.2.3	Conditions limites	117
4.2.4	Les paramètres physiques	118
4.2.5	Les équations de l'hydrodynamique	120
4.3	Ajustement de l'hydrodynamique du Bassin	122
4.3.1	Procédure	122
4.3.2	Données de calage	123
4.3.3	Validation du modèle en terme de hauteur	124
4.3.4	Validation du code en terme de vitesse	131
4.4	Exploitation des champs instantanés	136
4.4.1	Validité du modèle	136
4.4.2	Les tendances hydrodynamiques	145
4.5	Grandeurs caractéristiques de l'hydrodynamique	146
4.5.1	Maximum de la vitesse sur un cycle	146
4.5.2	Maximum de la vitesse de frottement sur un cycle	150
4.5.3	Vitesse résiduelle sur un cycle	155
4.6	Interprétation des cartographies en terme de transport sédimentaire	158
4.6.1	Observation des cartographies	158
4.6.2	Hypothèses d'évolution future	160
4.6.3	Discussion	160
4.7	Exemple d'application du code à l'étude d'une situation concrète	162
4.7.1	Situation du problème	162
4.7.2	Scénarii d'aménagement	163
4.7.3	Discussion	166
4.8	Conclusion	167

Annexes	185
Bibliographie	195

Nomenclature

Lettres latines

g	:	accélération de la pesanteur
f	:	paramètre de Coriolis
h	:	hauteur d'eau
h_b	:	élévation du fond
K_m	:	constante de Von Karman
K_s	:	coefficient de Strickler
t	:	temps
u, v	:	composantes du vecteur vitesse suivant x et y
\mathbf{V}	:	vecteur vitesse
z_0	:	longueur de rugosité (dépend de la nature du fond)

Lettres grecques

ϕ	:	la latitude
ρ	:	densité de l'eau
μ	:	viscosité dynamique
ν	:	viscosité cinématique
κ	:	perméabilité
$\frac{\nu}{K}(h\mathbf{V})$:	composantes du terme de Darcy

Opérateurs mathématiques

\cdot	:	produit scalaire
\otimes	:	produit tensoriel
∇	:	opérateur gradient
$\nabla\cdot$:	opérateur divergence
∂	:	dérivée partielle
$\ \cdot \ $:	norme d'un vecteur

Introduction Générale

La **zone littorale** subit de fortes sollicitations hydrodynamiques, chimiques, anthropiques. Il en résulte souvent une pollution des eaux, une mise à mal de la faune et de la flore et des **manifestations hydro-sédimentaires** telles que le recul des plages, l'engraissement des ports ou de l'embouchure des fleuves, la perte de puissance hydraulique des chenaux de navigation, l'érosion des falaises menaçant les constructions humaines, etc. Les photographies 1, 2 en donnent deux illustrations.

Les **baies côtières très peu profondes** sont des environnements particulièrement vulnérables. Protégées de la houle par un système de flèche et de passes plus ou moins formé, elles attirent une large population sédentaire et saisonnière, et des activités socio-économiques (professionnels du tourisme, de l'immobilier, pêcheurs, ostréiculteurs ou plaisanciers) dont la santé dépend de celle de la lagune.

La demande est forte d'expertises, de suivis des polluants, de propositions de travaux d'aménagements (protections ou rechargements des plages, dragages de ports ou de chenaux), visant à protéger cet environnement à la richesse fragile et surexploitée. Cela nécessite de pouvoir **appréhender les courants** qui sont à l'origine du transport sédimentaire, chimique ou benthique au sein de la baie, et qui sont induits par une hydrodynamique complexe. Recherche fondamentale et ingénierie travaillent à comprendre celle-ci, à la reproduire, à la prévoir à plus ou moins long terme, notamment au moyen de **modèles numériques** toujours plus perfectionnés afin de prendre en compte des situations de plus en plus réalistes.

L'objectif de la thèse est de développer un outil numérique pour la **simulation des**

écoulements tidaux en milieux très peu profonds. L'étude numérique des baies littorales impose des contraintes spécifiques comme l'utilisation de grands pas de temps, la prise en compte de topographies fortement irrégulières et la gestion du phénomène d'immersion et d'émergence des bancs intertidaux alternativement couverts puis découverts du fait de l'oscillation du plan d'eau générée la marée.

Nous veillerons à satisfaire simultanément ces demandes caractéristiques de la modélisation des systèmes lagunaires.

Le bassin d'Arcachon sera le site côtier naturel retenu pour la validation de notre outil de simulation numérique. Système lagunaire aux comportements physiques complexes, patrimoine régional particulièrement bien observé, il est un site idéal pour tester les performances du modèle développé.

Ce document s'articulera comme suit :

Dans une première partie, nous esquisserons d'abord l'état de l'art de la modélisation des écoulements en eaux peu profondes, dans le cadre desquels s'inscrit la modélisation de l'hydrodynamique des lagunes côtières. On y rappellera les équations classiquement résolues, les propriétés essentielles au modèle destiné à les résoudre et les schémas numériques proposés dans la littérature visant à répondre simultanément à ses critères forts.

Dans la seconde partie, nous présenterons le modèle physique développé au cours de la thèse, ainsi que les méthodes numériques utilisées pour sa résolution.

La troisième partie détaillera les cas tests théoriques qui ont permis de valider le modèle.

La quatrième partie sera dédiée à l'application du modèle au site côtier naturel du Bassin d'Arcachon et s'intéressera aux simulations de tendances hydro-sédimentaires réalisées après ajustement de l'hydrodynamique modélisée au sein de la lagune sous l'action de la marée seule.

Enfin nous concluons sur les perspectives qui resteront à apporter au travail ici rapporté.



Figure 1 : *Zones en érosion, recul de plage.*



Figure 2 : *Baie d'audierne, effet d'une digue sur le transit littoral.*

Chapitre 1

La modélisation numérique de l'hydrodynamique côtière

Appréhender les tendances hydrodynamiques d'une zone côtière, comprendre les processus à l'origine du transit sédimentaire dont elle est le siège pour ensuite estimer son évolution vers l'érosion ou le comblement, et enfin proposer des travaux d'aménagement en anticipant sur les conséquences écologiques pouvant affecter la zone à court ou long terme, sont quelques exemples de motivations à la conduite d'études, fondamentales ou appliquées, menées sur l'environnement littoral.

Le littoral est très diversifié, constitué aussi bien de falaises rocheuses, de longues plages sableuses abruptes ou en pente douce, de baies estuariennes ou lagunaires. Des structures aussi dissemblables ne connaissent pas les mêmes sollicitations hydrodynamiques et leurs morphologies n'interagissent pas de la même façon avec les écoulements. En conséquence, les moyens d'étude ne sont pas identiques.

Dans cette première partie, nous définirons tout d'abord les régions littorales spécifiquement concernées par le travail de thèse rapporté ici. Puis nous verrons les spécificités et les moyens d'investigation de ces régions. Nous justifierons le recours à la modélisation numérique et exposerons le modèle physique et les méthodes numériques classiquement utilisés pour l'étude de ces milieux. Après la présentation de quelques exemples de modélisations de baies largement étudiées dans le monde, nous focaliserons sur les modèles développés sur le Bassin d'Arcachon. Eclairés sur les difficultés et les contraintes propres à la simulation de l'hydrodynamique de tels environnements, nous concluerons sur nos

choix relatifs à l'outil numérique développé au cours de la thèse.

1.1 Problématique générale

Les écoulements en milieu littoral se caractérisent par une grande variété de phénomènes hydrodynamiques et sédimentaires qui interagissent à des échelles de temps et d'espace très diverses. La notion d'échelle spatio-temporelle est fondamentale : au travers de son prisme certains processus deviennent négligeables ou prépondérants, elle guide le choix des paramètres à prendre en compte. Il faut donc définir les objets et le cadre de l'étude avant toute autre démarche, puis ne prendre en compte que les paramètres pertinents.

Très généralement, on distingue deux processus moteurs à l'hydrodynamique côtière : celui des vagues et celui de la marée.

Les vagues sont générées au large des côtes par l'action du vent à la surface de l'eau. Il en résulte un mouvement essentiellement ondulatoire des masses d'eau transmis de proche en proche et contrôlé par la force de gravité. Le plus souvent, lorsque le vent souffle, la surface de l'eau est perturbée et se forme la mer du vent ; loin de la zone ventée, le mouvement des vagues s'organise en ondulations régulières et cohérentes pour former la houle. En arrivant sur les côtes, la profondeur d'eau diminue et la houle se cambre progressivement jusqu'à former des vagues déferlantes. Les vagues déferlantes représentent le processus hydrodynamique prépondérant sur les plages (amplitude moyenne de l'ordre de 1.5 m) [Saint-Cast 02]. Cependant, comme la zone de déferlement des vagues est très liée à la profondeur d'eau, la marée orchestre les effets de la houle en définissant le niveau moyen du plan d'eau.

La marée*, elle, est un large mouvement des masses d'eau à l'échelle océanique dont les oscillations sont entretenues par l'attraction des astres voisins de la Terre, principalement celle de la lune et du soleil. C'est une onde longue, composée d'harmoniques* plus ou moins prépondérantes selon les régions du globe et qui définissent sa période et sa gamme d'amplitude. Ainsi, il existe des points géographiques, dit amphidromiques*, où les effets de la marée sont nuls, et d'autres, comme la baie du Mont Saint-Michel, pour lesquels la différence des cotes des plans d'eau à basse mer et à haute mer, appelée marnage*,

peut atteindre une dizaine de mètres (13m au Mont Saint-Michel). De même certaines régions connaissent des marées diurnes*, d'autres semi-diurnes* (comme la côte atlantique française) ou encore mixte*.

Théoriquement, les effets des ces deux agents hydrodynamiques se conjuguent en un même lieu, mais des baies ou des estuaires à la morphologie particulière se trouvent abritées de la houle dont l'action est alors négligeable. Protégées de l'océan par une flèche sableuse plus ou moins stable et fermée, ces baies sont reliées à l'océan par un système de chenaux pratiqués dans des hauts bancs sableux formés de part et d'autre de l'inlet*. La flèche et les bancs en entrée de la baie arrêtent ou dissipent la houle qui ne pénètre pas au sein de la lagune. La figure 1.1 présente deux exemples d'inlets (USA et Australie). Dans ces configurations, le seul agent hydrodynamique influent au sein du domaine est la marée.

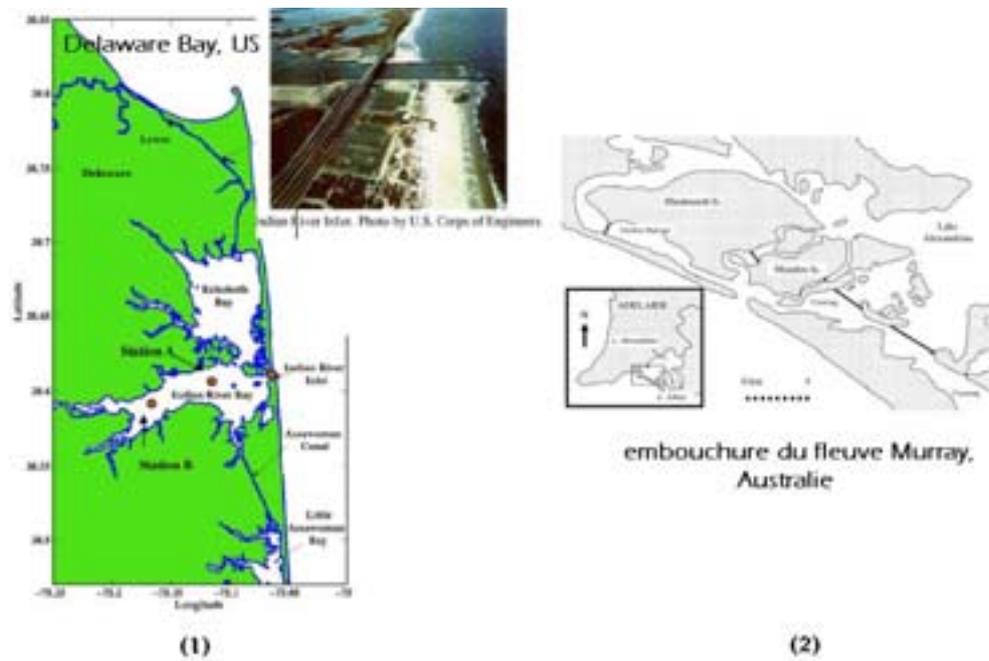


Figure 1.1 : Exemples d'inlets : la baie de Delaware, USA (1) et l'embouchure du fleuve Murray, Australie (2).

1.1.1 L'étude des lagunes tidales très peu profondes

Dans ce travail, nous nous intéressons précisément à ces sites côtiers protégés de la houle, dont l'hydrodynamique est gouvernée essentiellement par la marée. La houle ne sera pas abordée, nous ne chercherons pas à la reproduire par le modèle développé, ni à coupler ses effets à ceux de la marée en terme de courant ou de tension de radiation. Seule l'onde longue de marée sera considérée.



Figure 1.2 : Photographie de la Baie du Mont Saint-Michel.

L'autre caractéristique des sites concernés ici est leur très faible profondeur. La grandeur caractéristique verticale est très inférieure aux grandeurs caractéristiques horizontales. Si l'on se reporte à la figure 2.2, la profondeur H est très inférieure à dimension caractéristique horizontale L .

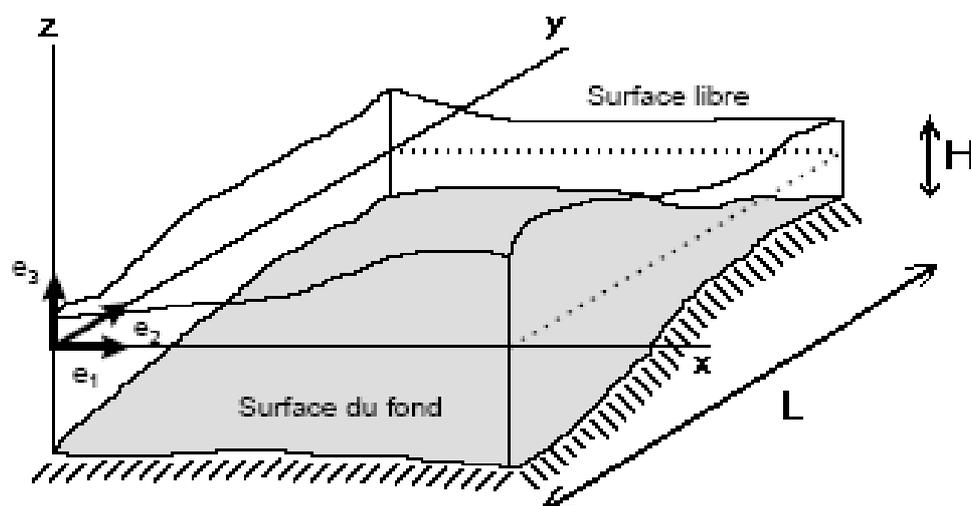


Figure 1.3 : *Milieux peu profonds : profondeur H très inférieure à la grandeur horizontale L , $H \ll L$.*

Dans ces régions de faible profondeur de fond, soumises à l'action tidale, l'altitude de certains bancs se situe entre la cote de basse mer et la cote de haute mer. Ces bancs, qualifiés de bancs intertidaux, se retrouvent donc alternativement immergés puis émergés au cours d'un cycle de marée. Ils sont le siège d'écoulements complexes générateurs de processus sédimentaires mal connus car cette spécificité des zones intertidales reste très difficile à reproduire précisément.

1.1.2 Les différentes méthodes d'étude des écoulements tidaux en milieux très peu profonds

Pour étudier ces systèmes côtiers, plusieurs types d'approches s'offrent à nous :

«– **L'approche analytique** qui formule mathématiquement les processus physiques. La multiplicité des phénomènes mis en jeu dans l'hydraulique maritime et, surtout, leurs interactions, limitent fortement sa pratique. Elle est, de fait, essentiellement envisageable pour l'étude d'un processus artificiellement isolé des autres. Ainsi, le ressaut hydraulique, le courant de dérive généré par une houle oblique sur fond plat, le phénomène de réfraction/diffraction de la houle sur pente plane, etc., sont des manifestations hydrauliques qui peuvent être décrites analytiquement dans des conditions idéales, en écartant tous les autres paramètres physiques agissant également sur l'écoulement réel (géométrie complexe du domaine, irrégularités du fond, conditions atmosphériques dont la contrainte de surface due au vent...). Malgré la difficulté d'étudier analytiquement un écoulement complexe, cette approche contribue à accroître notre connaissance de la physique des phénomènes et constitue aujourd'hui une base théorique de cas tests standards pour la validation des modèles numériques.

«– **L'approche expérimentale** qui repose sur des observations et des mesures *in situ*. Les équipements se perfectionnent et offrent un large champ d'investigation : relevés de vitesse (norme et direction) à diverses hauteurs dans la colonne d'eau (courantomètres * mécaniques, électromécaniques, électroniques, ADCP -Acoustic Doppler Current Profiler-), relevés de la cote de la surface libre (marégraphes, bouées, radar, télédétection), mesures de turbidité, sédiments en suspension, etc. Moyen d'investigation très utile à la compréhension générale des écoulements côtiers et des processus physiques induisant les courants et le transport sédimentaire, l'approche expérimentale convient aussi à l'étude d'un phénomène très confiné, local. Cependant, les campagnes de mesures deviennent vite trop coûteuses lorsqu'il s'agit de

couvrir la totalité d'un domaine lagunaire de quelques dizaines de kilomètres de côté. D'autant qu'elles doivent être répétées dans le temps pour obtenir un comportement moyen du domaine d'étude. Enfin certaines zones au comportement fortement tridimensionnel rendent trop délicate l'acquisition de mesures exploitables. Cependant, ponctuelles et adjointes aux résultats des modèles (physiques ou numériques), les mesures permettront la validation de ceux-ci.

«— Les **modèles réduits**, ou maquettes, qui reproduisent à petite échelle la zone d'étude. Ils sont utilisés notamment lorsque la physique est complexe et les apports de chaque processus sont difficilement appréciables et quantifiables pour permettre d'en négliger certains devant d'autres. En fait, ils se ramènent à une étude expérimentale d'un petit domaine, relié aux grandeurs réelles par des lois de similitude. Ils permettent, outre l'étude fondamentale des processus mis en jeu, de tester des scénarii d'aménagement et d'appréhender la réponse du système à toute modification du milieu. L'étude récente de la baie du Mont Saint-Michel par la SOGREAH à fait appel à un modèle réduit, visualisé sur la figure 2.3. Cependant les modèles réduits trouvent leurs limites dans les simplifications nécessaires à l'élaboration de la maquette, et au choix imposé à faire entre les lois de similitudes.

«— Les **modèles numériques**, enfin, qui sont basés sur une mise en équation issue de modèles physiques simplifiés. Ils représentent un moyen relativement accessible pour disposer d'une description spatiale et temporelle de l'écoulement, en terme de champs de vitesse, et de hauteur d'eau, à laquelle on peut coupler des modules de transport, et récemment de morphodynamique, c'est-à-dire de réactualisation des fonds en fonction des flux de sédiments calculés [Cayocca 96, Saint-Cast 02]. Les modèles numériques offrent une souplesse d'utilisation très appréciable, comme la possibilité d'ajouter ou soustraire la prise en compte de nombres de paramètres, d'isoler un processus... Mais ils ne peuvent se dispenser de mesures *in situ* qui valident leurs résultats et servent au calage des paramètres du modèle : par exemple, le coefficient de frottement sur le fond (coefficient de Chézy ou Strickler) qui rehausse ou abaisse la ligne d'eau, doit être finement ajusté spatialement afin de reproduire, sous les même conditions de forçage (marée, vent), les champs mesurés ponctuellement sur site. En effet, on doit s'assurer, en premier lieu, du juste calcul de l'hydrody-



Figure 1.4 : *Maquette du Mont Saint-Michel, SOGREAH.*

namique qui induit le transport des sédiments et, à terme, la modification des fonds.

C'est cette approche numérique que nous retenons ici pour l'étude des milieux côtiers très peu profonds soumis à la seule action de la marée, et d'une étendue de quelques dizaines de kilomètres au carré. On la reconnaît relativement moins coûteuse, plus aisée d'utilisation, et cette approche scientifique largement validée ces dernières années bénéficie d'une recherche active qui accroît toujours plus ses grandes potentialités. Elle est aidée en cela par les progrès informatiques et le gain de capacité de calcul scientifique. Enfin, la co-tutelle du laboratoire TREFLE qui jouit d'une expertise reconnue en modélisation numérique, met à disposition de ce travail des outils et des moyens à la pointe des développements du moment et aux performances prouvées.

Notre but est de développer notre propre outil numérique, entièrement contrôlable et modifiable à l'envi selon nos besoins, et de proposer une nouvelle approche du problème.

Nous avons, pour cela, procédé d'abord à une revue bibliographique : elle renseigne sur le modèle physique à adopter, et des différentes méthodes numériques utilisées pour ré-

pondre de façon plus ou moins satisfaisante aux fortes exigences propre à la simulation des écoulements tidaux dans des systèmes lagunaires complexes.

1.1.3 Le choix de l'outil numérique

Très tôt, des modèles numériques ont équipé les bureaux d'études d'hydraulique maritime.

Parallèlement à leur utilisation faite par l'ingénierie, les codes de calcul sont un outil privilégié d'une recherche scientifique visant la connaissance fondamentale des processus en jeu dans les régions côtières. En effet, permettant d'isoler des mécanismes, d'en négliger d'autres, de dissocier et/ou d'associer certains, les modèles numériques se prêtent idéalement à une recherche, très en amont des travaux de bureaux d'études, qui tend à caractériser les processus contribuant à l'hydrodynamique et à la morphodynamique littorale [Hir 00].

A terme, les résultats de cette recherche fondamentale peuvent donner lieu à l'implémentation de modules ou formulations nouvelles dans les modèles numériques, assurant ainsi un transfert des connaissances du laboratoire vers le bureau d'études.

Afin de rendre les codes de calcul toujours plus performants et précis, physiciens et numériciens collaborent constamment à leur perfectionnement. Servis par les progrès informatiques permanents, ils permettent la simulation d'écoulements côtiers de plus en plus complexes, dans des échelles de temps et d'espace de plus en plus grandes, offrant une précision accrue.

D'abord bidimensionnels, uniquement dédiés aux écoulements tidaux sur bathymétries idéales, les modèles ont peu à peu pris en compte d'autres facteurs : la houle (champs de hauteurs, d'énergie), les conditions climatiques (vent, pression atmosphérique), la salinité, les bathymétries fortement irrégulières, la turbulence (grâce à la simulation des grandes échelles, SGE-LES). Des couplages du calcul de l'hydrodynamique avec des modules consacrés à d'autres mécanismes physiques ou biologiques ont été réalisés : transport sédimentaire, morphodynamique (réactualisation des fonds) - [Vriend 93, Cayocca 01], couplage avec les disciplines halieutiques (déplacements des populations de poissons), chimiques

(transports de polluants).

Et puis, les modèles quasi-tridimensionnels - multicouches - ou tridimensionnels ont été développés, permettant la représentation d'écoulements non uniquement contenus dans le plan horizontal.

De nouveaux algorithmes de résolution, plus rapides et précis, ont renforcé la robustesse et l'efficacité des modèles. La parallélisation des codes permet d'envisager la simulation de domaines plus vastes, plus finement décrits : en répartissant sur plusieurs processeurs le même calcul anciennement géré par un seul processeur, on réduit d'autant le temps alloué au calcul.

Ainsi, les modèles sont en constante évolution et connaissent des versions successives. Les premières simulations de la marée au sein de la Morecambe Bay par le modèle de Flather et Heaps [Flather 75] datent de 1975, mais ce modèle sera perfectionné, implémenté, et appliqué à nouveau à la même baie en 1991, plus précis et robuste vis à vis des chocs numériques notamment [Flather 91]. Le modèle développé par Casulli, TRIM -puis UNTRIM-, se complexifie lui aussi au fil de ses recherches [Casulli 90, Cheng 93a, Casulli 98b, Casulli 00], et inspire d'autres codes, parmi lesquels ELCOM [Hodges 00]. Autre exemple, le code TELEMAC, développé et géré par le Laboratoire National d'Hydraulique et d'Environnement (LNHE) d'EDF [Hervouet 96] est fréquemment actualisé, enrichi de nouvelles implémentations.

Désirant mettre en place notre propre outil numérique dédié à la modélisation des écoulements tidaux en zone côtière, nous nous intéressons aux modèles bidimensionnels horizontaux. Dans les paragraphes suivants, nous présentons les équations classiquement résolues par ce type de modèle, rappelant sous quelles hypothèses et dans quel domaine de validité on les applique. Puis nous précisons les principales contraintes qui orientent leur résolution, et envisageons les différentes méthodes proposées dans la littérature pour y parvenir. Enfin nous finissons par les raisons qui ont guidé nos propres choix quant aux stratégies adoptées pour le développement du modèle mis en place au cours de la thèse.

1.2 Les modèles physiques.

Pour décrire les écoulements dans la zone littorale, on résout classiquement le système des équations de Saint-Venant, aussi nommées "Shallow Water Equations". Après un rapide rappel de l'historique de ce système largement utilisé de nos jours dans des modèles numériques, nous rappellerons les hypothèses et limites de son domaine de validité.

1.2.1 Les équations de Saint-Venant

En 1871, Adhémar Jean-Claude Barré de Saint-Venant, ingénieur des Ponts et Chaussées [And], publie une étude des équations de Navier-Stokes dans un *Compte Rendu de l'Académie des Sciences* [de Saint Venant 71] : y apparaissent pour la première fois les équations qui porteront son nom. Depuis la fin du 19^{ème} siècle, ce système hyperbolique des équations de Saint-Venant permet la modélisation des écoulements de fluides géophysiques à surface libre en milieux "peu profonds". Du fait de sa validité expérimentale et de son efficacité numérique largement reconnues, il est utilisé pour la simulation de nombreux phénomènes naturels dont la prédiction est aujourd'hui devenue un enjeu économique de première importance : étude des crues, protection environnementale (pollution en mer, suivi de rejets en milieux aquatiques), stabilité d'ouvrages, calcul des marées, sédimentologie... autant de problèmes, fluviaux comme maritimes, à la physique complexe dont l'approche expérimentale est difficilement envisageable et qui doivent être traités au moyen de modèles unidimensionnels, bidimensionnels ou multi-couches, résolvant les équations de Saint-Venant. D'où l'engouement sans précédent ces dernières années pour la résolution numérique de ces équations, qui suscite ainsi de nouvelles interrogations, de nouveaux défis. Pour y répondre, on s'appuie sur les progrès qui ont été accomplis sur les performances des ordinateurs, dans le domaine du calcul scientifique et des méthodes numériques développées pour la modélisation de phénomènes physiques tout à fait étrangers à l'hydraulique fluviale ou maritime. Ces avancées ont permis d'enrichir considérablement l'éventail d'outils pour la résolution de ce système de Saint-Venant dans des situations de plus en plus complexes, tel un système lagunaire réel comme le Bassin d'Arcachon.

Nous verrons par la suite quels sont ces outils et comment ils s'agencent pour satis-

faire aux exigences propres aux modèles pour l'hydrodynamique côtière. Mais rappelons d'abord les équations proprement dites et leur domaine de validité.

1.2.2 Hypothèses et domaine de validité

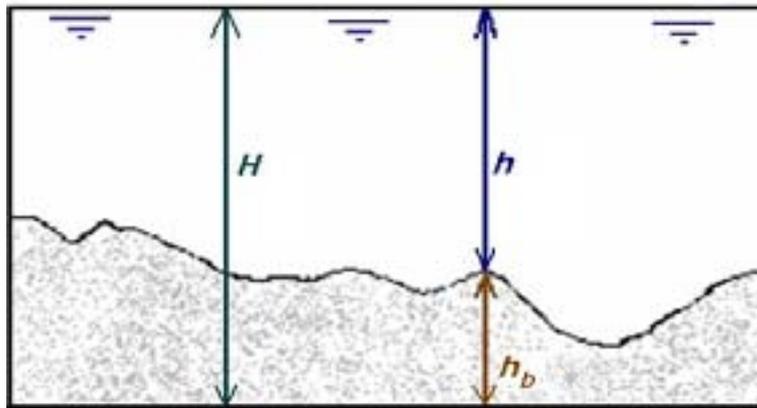


Figure 1.5 : présentation des variables des équations de Saint-Venant.

Les équations décrivant les écoulements à surface libre se retrouvent à partir du système tridimensionnel des équations de Navier-Stokes. Sous des hypothèses simplificatrices, on se ramène à un système bidimensionnel, et on réduit le nombre d'inconnues à trois : h la hauteur d'eau et u et v les composantes cartésiennes horizontales du vecteur vitesse \mathbf{V} . Elles se définissent en fonction des coordonnées spatiales cartésiennes (x, y) et temporelle (t) :

$$h = h(x, y, t), \quad u = u(x, y, t), \quad v = v(x, y, t)$$

Hypothèses simplificatrices

L'hypothèse est faite des milieux peu profonds, pour lesquels la profondeur d'eau est très inférieure à la grandeur caractéristique horizontale du domaine d'étude [Pedlosky 87]. La longueur d'onde, grande par rapport à la profondeur (devant les autres dimensions), exclut la houle du domaine de validité des équations. On suppose également que la pression est proche de l'équilibre hydrostatique et que les variations verticales de la vitesse sont faibles et négligeables devant les autres variables.

Sous ces hypothèses, partant du système tridimensionnel des équations de Navier-Stokes, on intègre les équations suivant la verticale entre le fond et la surface libre et l'on se ramène à un modèle bidimensionnel. Les inconnues sont alors : la hauteur d'eau h et u et v et les composantes horizontales du vecteur vitesse, moyennées suivant la hauteur d'eau.

Pour un fluide incompressible newtonien, on obtient le système bidimensionnel suivant, dans sa forme conservative :

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h + h_b)}{\partial x} + \frac{\partial(\nu h \frac{\partial u}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(\nu h \frac{\partial u}{\partial y})}{\partial y} \quad (1.1)$$

$$\frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} = -gh \frac{\partial(h + h_b)}{\partial x} + \frac{\partial(\nu h \frac{\partial v}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(\nu h \frac{\partial v}{\partial y})}{\partial y} \quad (1.2)$$

$$\frac{\partial(h)}{\partial t} + \frac{\partial(hu)}{\partial x} + \frac{\partial(hv)}{\partial y} = 0 \quad (1.3)$$

où : t est le temps, (x, y) sont les coordonnées cartésiennes d'un point dans le plan horizontal, $h(x, y, t)$ est la hauteur d'eau, $h_b(x, y, t)$ l'élévation du fond, $u(x, y, t)$ la composante du vecteur vitesse selon l'axe des abscisses, $v(x, y, t)$ sa composante selon l'axe des ordonnées, ν la viscosité cinématique du fluide, et g la norme du vecteur accélération.

Dans cette écriture des équations de la conservation de la quantité de mouvement, on omet la force de Coriolis, le terme de frottement et la contrainte surfacique due au vent qui constituent des termes sources des équations (2.1-2.3). Lors des simulations des

écoulements dans le Bassin d'Arcachon, la force de Coriolis et le frottement sur le fond sont pris en compte.

Comme dans de multiples outils de calculs existants, c'est le système des équations de Saint-Venant, hyperboliques, que l'on va chercher à résoudre dans le but de simuler, dans un site côtier aussi complexe que le Bassin d'Arcachon, les écoulements gouvernés par l'action de la marée.

1.3 Les méthodes numériques

1.3.1 Les difficultés propres à la modélisation numérique de l'hydrodynamique littorale

Comprendre la physique qui régit les écoulements dans les régions littorales est une base primordiale pour l'étude des processus de transport sédimentaire ou de dispersion de polluants dans le milieu maritime. C'est aussi un prérequis pour une gestion efficace du littoral.

La modélisation numérique est le moyen le mieux adapté à l'étude et à la reproduction de l'hydrodynamique de ces zones soumises à la marée, car elle permet de simuler chaque processus individuellement en l'isolant des autres manifestations simultanées, puis d'étudier ses interactions avec les autres processus physiques, de proposer des scénarii à moindre coût...

De nombreux modèles sont développés à cette fin, pour la recherche comme pour l'ingénierie.

Cette partie traite des contraintes majeures qui orientent le développement d'un modèle voué à la simulation de l'hydrodynamique côtière en milieux très peu profonds.

Equations hyperboliques

A la base des modèles bidimensionnels pour la simulation des écoulements tidaux en zone côtière très peu profonde, on retrouve classiquement le système des équations en eaux peu profondes (Shallow Water Equations), connu en France comme le système des équations de Saint-Venant, vu précédemment. Ces équations sont hyperboliques et leur résolution pour la description des écoulements à surface libre requiert des méthodes et des schémas numériques évolués et robustes.

C'est la première difficulté mathématique à prendre en compte lors du développement d'un code de calcul de l'hydrodynamique côtière : l'équiper des discrétisations spatiale et temporelle et des méthodes de résolution numériques adéquates, garantissant une grande stabilité et une grande précision du calcul. Comme le rappelle Ip [Ip 98], les écoulements

sont fortement non-linéaires à leur entrée dans une lagune peu profonde de topographie très irrégulière, les ondes de marée se déforment notamment au niveau des régions très peu profondes et des platiers alternativement émergés et immergés : les profils de vitesses se raidissent fortement.

Grands pas de temps

Les simulations en hydraulique maritime s'étendent généralement sur une durée considérable, de plusieurs cycles de marées à plusieurs mois, afin de reproduire les effets d'évènements d'amplitudes diverses, de comprendre le fonctionnement d'un site soumis à une succession de marées de coefficients croissants, puis décroissants.

Dans le cas du couplage de l'hydrodynamique avec un module de transport sédimentaire et de morphodynamique, phénomènes largement plus lents, d'une échelle temporelle supérieure, il faut encore allonger les durées simulées, du moins si l'on a pas recours, comme le fait Cayocca [Cayocca 01], à des évènements représentatifs.

Dans tous les cas, les temps de simulation mis en jeu sont bien supérieurs aux temps de simulations rencontrés dans d'autres domaines de la mécanique des fluides, eux-aussi adeptes de la modélisation numérique, étudiant les écoulements dans des turbines, ou autour de structures aéronautiques, pour des régimes fortement turbulents, voir compressibles.

En ce qui concerne l'hydrodynamique côtière et le transport sédimentaire, les échelles de temps sont de l'ordre du mois, de l'année, les échelles d'espace de l'ordre de quelques dizaines de kilomètres. Les grandeurs caractéristiques nettement plus importantes imposent des pas de temps en conséquence plus importants : il faut pouvoir envisager l'utilisation de "grands" pas de temps, excédant la dizaine de secondes, et ce, même en présence d'écoulements régionalement complexes et difficiles à calculer, pour ainsi réduire au mieux le temps et le coût du calcul. Car la recherche d'efficience du code est en effet primordiale dans la mise en place de la simulation numérique.

Topographie complexe

Les fonds fortement irréguliers, caractéristiques de certaines lagunes, où les platiers intertidaux sont creusés, parfois profondément et de manière abrupte, par un réseau de chenaux, représentent également un élément contraignant pour le modèle.

En effet, cet aspect va guider le choix du type de maillage et les algorithmes associés pour se prémunir des chocs numériques générés notamment au niveau de zones intertidales, et qui se propagent ensuite vers les mailles voisines. Ces chocs, qui n'apparaissent pas dans le cas de plages planes en pente douce, seront, dans le cas de topographies accidentées, d'autant plus importants que le maillage sera grossier [Georges 95]. Ainsi, se pose la question du niveau de raffinement de maillage, du choix ou non d'approximations sur des grilles non structurées, d'un maillage fixe ou adaptatif (cf les modèles existants)...

La forme du fond oriente également le choix de la discrétisation temporelle, implicite ou explicite. Les travaux de Tseng [Tseng 04], exposés dans le chapitre dédié à la validation du modèle, illustrent bien la nécessité, dans le cas des codes explicites, d'un traitement spécifique d'un terme source de topographie afin de bien gérer les bathymétries complexes, fortement irrégulières.

Gestion des zones intertidales

Enfin, dernière difficulté majeure à prendre en compte dans le modèle : l'existence des zones intertidales dans le domaine de calcul.

Les zones dites **intertidales** *, ou estrans *, sont ces régions très peu profondes qui, soumises aux oscillations du niveau de l'eau -provoquées par la marée notamment, mais aussi, dans une moindre mesure, par les conditions climatiques (pression atmosphérique, vent)- sont successivement couvertes (mouillées) puis découvertes (sèches) par l'océan. Elles sont donc émergées (sèches) par marée basse de grande vive eau et immergées à marée haute. Dans certaines lagunes, les zones intertidales peuvent représenter la majorité de la superficie de la baie. Ainsi, dans le cas du Bassin d'Arcachon, elles couvrent 70% de la superficie totale du bassin [Thauront 94]!



Figure 1.6 : *Photographies de bancs émergents dans la baie de (zone des passes):Par Yann Arthus Bertrand.*

La présence plus ou moins importante des zones intertidales est une caractéristique qui influence grandement les écoulements dans une baie. Leur présence est en effet à l'origine de nombreux mécanismes physiques qui agissent sur l'hydraulique locale. Les ondes longues, telle que la marée, se voient transformées à leur entrée dans la lagune du fait de l'interaction entre l'hydrodynamique et la géométrie du bassin [Greenberg 05]. Les variations de la hauteur d'eau au gré de la marée affectent la forme et la vitesse de phase de l'onde [Lamb 32], et à plus forte raison au niveau des bancs intertidaux. Les profils de vitesse et les courbes de hauteur d'eau s'asymétrisent fortement dans les zones très peu profondes où les termes prépondérants de l'équation de la quantité de mouvement - le terme d'advection et le gradient de pression- s'équilibrent [Stigebrandt 80, van de Kreeke 88].

Un autre facteur jouant sur l'hydrodynamique des zones intertidales est la nature du sédiment. En ces régions, les courants plus faibles que dans les chenaux, charrient ou déposent des grains plus fins que dans le reste de la lagune, ce qui contribue à modifier le frottement sur le fond. Cela transforme encore la propagation des ondes longues, et accentue les différences de phase et la dispersion au sein de la baie tidale [Okubo 73]. Ces nombreux phénomènes locaux, résultant directement de l'écoulement au-dessus des bancs intertidaux, agissent fortement sur la turbidité et les propriétés du sédiment [Hir 00]. Mais pour comprendre et reproduire numériquement les processus de transport sédimentaire mal connus dans ces régions, il est nécessaire de modéliser au mieux les écoulements qui les induisent.

Or, comme le souligne, en 2005, Greenberg et al. [Greenberg 05], le traitement numérique des zones sèches, très délicat, est encore souvent trop approximatif dans les codes pour la modélisation des milieux peu profonds. Cela peut se traduire par des erreurs d'évaluation de l'aire immergée, du volume d'eau contenu dans la baie, et surtout par un manque de fiabilité des courants calculés dans les zones sèches qui empêche dès lors toute velléité de calcul du transport local.

1.3.2 Objectifs

Le but de notre travail est de développer un outil numérique pour la simulation des écoulements tidaux satisfaisant au mieux et simultanément ces quatre exigences fortes : proposer un modèle représentatif de la physique et mettre au point des méthodes numériques précises, avec des coûts de calcul moindres, qui permettront d'améliorer la simulation des situations les plus complexes et de procéder à l'étude de processus physiques mal connus, peu investigués numériquement jusqu'alors. La bibliographie rend compte d'une multitude de propositions de méthodes pour y parvenir, et des écueils rencontrés.

1.3.3 Les différentes méthodes existantes

Un grand nombre de codes existe pour modéliser les écoulements tidaux en milieux peu profonds. Ils sont très divers, combinant de façons originales des schémas de discrétisation, des maillages et des algorithmes de résolution tout à fait différents. Difficile dès lors de constituer un classement de ces codes et une hiérarchisation de ceux-ci car il n'existe pas un schéma numérique idéal pour modéliser les courants moyens en eaux peu profondes. Nous envisageons ici les grandes familles de méthodes les plus fréquentes et leurs avantages et inconvénients au regard des contraintes de développement vues précédemment.

Les différentes familles de méthodes numériques

Les modèles pour l'hydrodynamique côtière reposent essentiellement sur les équations de Saint-Venant qui sont résolues grâce à des schémas et méthodes numériques très diverses.

Schémas de discrétisation

Le calcul des champs de courant et de hauteur dans une baie soumise à l'action de la marée ne se fait pas de façon continue dans le temps ni dans l'espace. On ne représente son évolution que pour une succession finie d'instantanés (discrétisation temporelle), et pour un nombre fini de points du domaine physique étudié (discrétisation spatiale). Ainsi, dans l'espace quadrillé d'un maillage définissant les points où, à chaque itération, hauteurs et vitesses sont calculées, la résolution des équations est réalisée à chaque itération, séparée

de la suivante d'un intervalle de temps Δt . Les techniques de discrétisation, temporelle et spatiale, influent grandement sur la stabilité de la résolution comme sur la précision de la solution.

On peut classifier des modèles suivant le schéma de discrétisation choisi. Certains utilisent la Méthode des Eléments Finis (FEM), d'autres la Méthode des Volumes Finis (FVM) ou enfin la Méthode des Différences Finies (FDM).

Les éléments finis ont été abondamment utilisés dans l'étude du système de Saint-Venant, du fait de leur antériorité comme de leur utilisation dans des logiciels d'hydrodynamique résolvant à la fois Navier-Stokes et Saint-Venant (cf TELEMAC). Abondamment validée, cette méthode fournit aujourd'hui encore des algorithmes rapides et des résultats souvent satisfaisants [Audusse 04]. Parmi eux, les modèles de Flather and Heaps (1975), Leendertse et Gritton (1971), par exemple. Les éléments finis prédisposent aux maillages non structurés, triangulaires, qui facilitent la description de topographies complexes très irrégulières.

Les schémas aux différences finies sont une famille populaire car ils exploitent simplement des développements limités à un certain ordre.

Les volumes finis, quant à eux, ont pour avantage d'être tout à fait adaptés à la mécanique des milieux continus, et aux problèmes conservatifs. La méthode des volumes finis, par une discrétisation directe de la forme intégrale des lois de conservation inhérentes à la mécanique des fluides, est un bon compromis entre les éléments finis et les différences finies.

Discrétisation temporelle

La discrétisation temporelle fait l'objet de plusieurs approches telles que la discrétisation explicite [Peraire 86, Vreugdenhil 90], semi-implicite [Casulli 90], et entièrement implicite [Stelling 84].

La discrétisation explicite résout une variable au temps t^{n+1} en fonction de variables au temps n et d'autres au temps $n - 1$.

La discrétisation implicite ou semi-implicite résout les trois inconnues H^{n+1} , U^{n+1} , V^{n+1} lors de la même itération et en fonction de la solution de l'itération précédente. Sur les maillages structurés, les techniques de décomposition par direction (Alternate Direction Implicit : ADI) sont souvent employées pour faciliter la résolution des méthodes implicites. Elles permettent de réduire le problème à la résolution d'un système tridiagonal, mais elles

sont difficiles à optimiser pour des configurations générales (Mitchell et Griffiths (1980)).

Les approches implicites ou semi-implicites permettent de s'affranchir de la condition de stabilité de type CourantFriedrichsLewy, dite "CFL". Cette condition s'exprime par une relation entre la vitesse de propagation numérique et la célérité de l'onde : $CFL = \Delta t \sqrt{gH} / \Delta x < 1$, où Δt est le pas de temps et Δx le pas d'espace. Elle impose ainsi une contrainte sur le pas de temps, nécessitant, dans les cas critiques, de diminuer celui-ci afin que la résolution reste stable. En s'affranchissant de cette condition qui lie le pas de temps au pas d'espace, et qui est nécessaire en résolution explicite, on autorise l'emploi de grands pas de temps.

Discrétisation spatiale

Là encore, plusieurs stratégies sont possibles : maillage fixe, structuré, non structuré et adaptatif. Il existe des maillages fixes cartésiens, triangulaires, raffinables ou pas localement, et des maillages mobiles, s'adaptant au domaine changeant au cours de la simulation. Mais les simulations sur un long laps de temps telles que pour le calcul de la morphodynamique de sites fluviaux ou côtiers, dont la géométrie change au cours de la simulation, s'accordent mal avec l'utilisation de limites de domaine mouvantes sur grilles non structurées. En effet les remaillages fréquents peuvent au final se révéler coûteux en calcul et de fait difficiles à utiliser [Rosatti 90].

Les différents traitements des zones sèches

La modélisation des zones alternativement immergées puis émergées, fréquentes dans les baies peu profondes, présente des difficultés numériques tout à fait particulières, puisque le domaine de résolution des équations évolue à chaque itération du calcul. On peut distinguer deux catégories [Ip 98, Jiang 05] parmi les traitements numériques développés jusqu'à aujourd'hui pour gérer ces problèmes spécifiques. Il y a d'une part les modèles avec grille de calcul déformable, et d'autre part, les modèles avec grille de calcul fixe.

Grilles fixes

La plus grande partie des approches des zones intertidales ont été pensées pour des maillages aux limites fixes.

Basiquement, les mailles (dans le cas de méthodes des différences finies ou volumes finis) ou les éléments (dans le cas de méthodes des éléments finis) connaissent deux états dé-

pendant de la hauteur d'eau calculée : l'état "actif", immergé, pour lequel les équations de Saint-Venant sont résolues, et l'état "passif", sec, sans écoulement. Ce traitement est implémenté dès les premiers modèles opérationnels par Leendertse [Leendertse 70] ou Flather et Heaps [Flather 75]. Dans sa forme la plus simple, chaque maille, ou élément du domaine tout entier fonctionne binairement en "on/off" : au-dessous d'une valeur seuil minimum de la hauteur d'eau, ϵ , les composantes de la vitesse sont imposées à zéro et la cote de la ligne d'eau est égale à celle du fond à ϵ près. Lors de la remise en eau des éléments secs à la frontière "zone mouillée/zone sèche", le calcul de la cote d'eau se fait par extrapolation des cotes des éléments mouillés voisins (e.g. Reid et Bodine, 1968; Flather et Heaps, 1975; Yeh et Chou, 1979; Leendertse, 1987; Thomas et al., 1990; Yu et al., 1990; Cialone, 1991; Jelesnianski et al., 1992; Hervouet et Janin, 1994).

Seulement, en intervenant ainsi sur la cote de la surface libre pour la fixer au niveau de celle du fond, on impose une pente de la surface libre artificielle, ce qui engendre un gradient de pression artificiel. La figure schématise la méthode, et l'on voit bien la surface libre artificiellement inclinée.

Des améliorations ont, dans certains cas, été apportées pour que la transition "zone mouillée/zone sèche" se fasse plus graduellement et pour éliminer ce gradient de pression artificiel. Thomas et al. [Thomas 90] résout les éléments mouillés et secs comme précédemment, mais propose en plus, pour les points constituant la transition, un troisième traitement : dans cette région, est résolue l'équation réduite de la quantité de mouvement, basée sur l'hypothèse de l'équilibre au premier ordre entre le terme de friction et le gradient de pression [Thomas 90, Ip 98, Heniche 00, Jiang 05].

Une autre approche des zones intertidales est basée sur la modification locale des équations grâce à l'introduction, dans le système, d'une "fonction de phase", variant de 0 à 1 selon la hauteur d'eau, pour exemple la méthode de "la marche poreuse" ("*marsh porosity*") par Thomas et al., et les techniques similaires par Flather et Hubbert (1990) ou Defina et al. (1994), Ip (98).

Dans cette approche, les équations de l'hydrodynamique sont résolues aussi bien dans les régions mouillées que dans les régions sèches, et une couche poreuse située sous le fond marin permet un écoulement souterrain. La hauteur d'eau peut ainsi être négative, comme le représente la figure , et il n'est plus besoin d'imposer aux variables des valeurs arbitraires telle une hauteur seuil ou une vitesse nulle. Mais cet avantage de la méthode est nuancé par la non-conservation de la masse et de la quantité de mouvement [Jiang 05]. Or, quels que soient les efforts faits pour remédier au problème, la conservation n'est com-

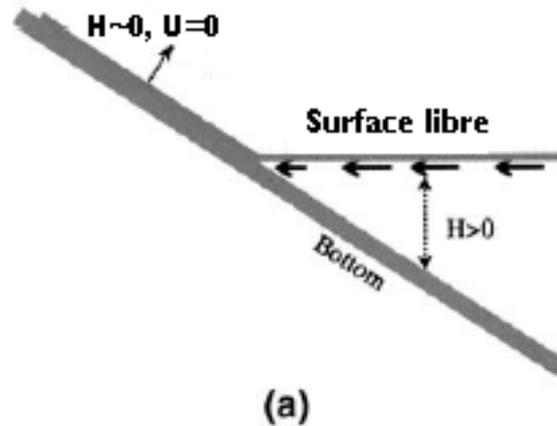
 les différentes approches numériques des zones intertidales


Figure 1.7 : *Approche classique: imposition des hauteurs et vitesses nulles dans la zone émergée.*

D'après Jiang et al. [?]

plètement satisfaite que pour des vitesses nulles strictement dans la zone sèche, donc par une imposition de celles-ci.

Grilles mobiles

Enfin, il existe des approches numériques des zones intertidales basées sur les maillages déformables : le traitement des limites mobiles se fait grâce au suivi d'interface ou "front-tracking". La grille de calcul se déforme au cours de la simulation, de manière à ce que son bord corresponde à la position du rivage (shore) (définie par une hauteur d'eau, un transport normal et une vitesse normale nuls). A chaque itération, la hauteur d'eau, la vitesse horizontale et la position de la grille sont remises à jour. Pour cette approche mathématique, les éléments finis sont les plus appropriés [Ip 98]. Mais, malgré des techniques conceptuellement attractives, développées pour accommoder les codes à éléments finis à ce problème de domaine de calcul déformable, en pratique cela conduit à des maillages outrancièrement déformés, et à des coûts de calcul importants du fait du remaillage continu. Ainsi, bien que cette approche soit reconnue comme la plus précise (Side'n and

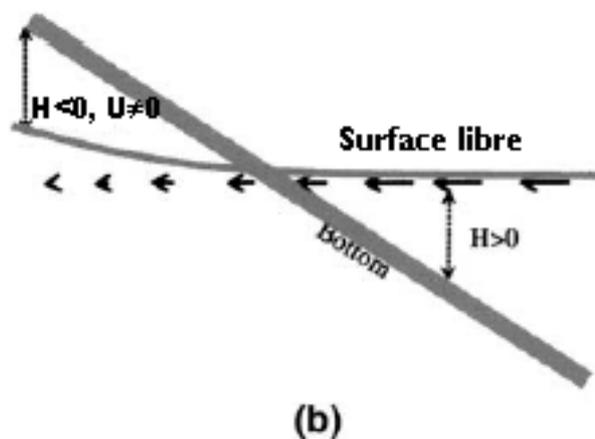


Figure 1.8 : *Approche avec marche poreuse, sans pente artificielle de la surface libre.*
D'après Jiang et al. [Jiang 05]

Lynch (1988) Sielecki and Wurtele, 1970; Lynch and Gray, 1980), elle se voit restreinte à l'étude de situations idéales, et son application ne peut être envisageable pour l'étude d'un domaine de topographie complexe, telle une baie dotée de larges zones intertidales.

1.3.4 Synthèse

On le voit, il existe dans la littérature un grand nombre de constructions numériques pour modéliser les écoulements tidaux peu profonds et représenter le phénomène d'immersion/émergence : en deux ou trois dimensions, par la méthode des différences finies, volumes finis ou éléments finis, sur des maillages structurés ou non, fixes ou adaptatifs, proposant divers traitements des zones intertidales. Aucun modèle ne s'est imposé face aux autres.

Quatre de ces méthodes, différentes dans leurs approches des processus physiques et numériques, de la gestion des zones sèches et de la parallélisation des méthodes, ont été comparées sur un même site côtier par Pluss et Schüttrumpf [Pluss 04].

Elles ont été toutes quatre appliquées à la simulation des processus tidaux, validées par comparaison avec des mesures *in situ* puis testées quant à leurs prédictions de la modification des champs hydrodynamiques par suite d'aménagements apportés à un estuaire. Les modèles sont :

- «– 1. UnTrim : une méthode aux volumes finis, 2D ou 3D, utilisant un maillage orthogonal non structuré [Casulli 98b]
- «– 2. Telemac : une méthode aux éléments finis, 2D ou 3D, utilisant un maillage triangulaire [Hervouet 96]
- «– 3. Trim : une méthode aux différences finies, 2D ou 3D, utilisant un maillage rectangulaire [Cheng 93b]
- «– 4. Martin : une méthode aux éléments finis utilisant un maillage triangulaire [Milbradt 02]

Les caractéristiques de ces quatre codes et les paramètres de modélisation utilisés sont recensées dans le tableau 1.9.

Au final, les auteurs arrivent à la conclusion que les résultats sont relativement proches entre les différents modèles et les mesures. Ils obtiennent pour les modifications du fond des tendances similaires en direction (croissance/décroissance) et intensité. C'est d'ailleurs sur cette bonne concordance des solutions que les auteurs se basent pour prédire une marge de fiabilité des modifications à attendre en présence de tel ou tel scénario d'aménagement d'un site côtier.

Ainsi, malgré les divergences de méthodes numériques à l'origine des modèles utilisés, les champs hydrodynamiques reproduits sont quasiment semblables. Pluss et Schüttrumpf rappellent cependant que pour cela, un travail d'investigation approfondi de chacun des codes est nécessaire afin d'acquérir une expérience de son fonctionnement, de son traitement des zones sèches notamment, et de permettre ensuite un calage juste et une bonne interprétation des résultats.

	UnTrim-2d / 3d	Telemac-2d	Trim-2d (3d)	Martin-2d
Procedure	Finite Volume	Finite Element	Finite Differen.	Stabilised FEM
Dimension	2d / 3d	2d	2d (3d)	2d
Element config.	Orthog. triangle	Triangle	Rectangular	Triangle
Multi/Singleproc.	multi	multi	multi	multi
Time step	constant	variable= f(Cr)	constant	variable= f(Cr)
Wetting/drying	ON/OFF	ON/OFF	ON/OFF	$V_L = 0, V_{II} \neq 0$
Coriolis	YES	YES	YES	YES
Wind forcing	YES	YES	YES	YES
Salinity transport	2d / 3d	2d	2d	2d
Bottom friction	variable	variable	variable	variable
Distribution	commercial	commercial	commercial	public domain
Supplier	Uni. Trento Prof. Casulli	LNH/EDF, Dr. Hervouet	Uni. Trento Prof. Casulli	Uni. Hannover Dr. Milbradt

Figure 1.9 : *Caractéristiques des codes comparés par Pluss and Schüttrumpf, 2004.*

1.4 Exemples d'application de codes 2DH à l'étude de sites côtiers naturels.

Comme nous l'avons déjà souligné, les baies, estuaires, lagunes, sont des systèmes côtiers aux enjeux économiques et écologiques accrus du fait de l'occupation et de l'exploitation croissantes par l'homme de ces sites complexes à l'équilibre fragile. Outre leur intérêt pour la recherche fondamentale dans la connaissance des processus physiques intervenant dans les régions littorales peu profondes, les codes 2DH sont un outil privilégié pour l'étude de tels environnements.

Ces études peuvent être menées par des laboratoires de recherches ou d'importants bureaux d'études pour lesquels les transferts recherche/ingénierie ont grandement contribué à améliorer les versions des modèles numériques les équipant.

Par quelques exemples de modèles appliqués à l'étude des écoulements tidaux au sein de baies situées de par le monde, nous verrons ici les différentes exploitations faites d'un modèle bidimensionnel pour les écoulements tidaux, les types de difficultés rencontrées lors de leur simulation dans des systèmes lagunaires ou estuariens très peu profonds, aux larges estrans.

1.4.1 La Baie de Morecambe

En 1975, Flather et Heaps [Flather 75] réalisent une première modélisation de la Baie de Morecambe située en Grande Bretagne sur la bordure Est de la mer d'Irlande. Cette baie, très protégée, est l'objet d'études récurrentes, Annan en fera un autre modèle de hauteur d'eau [Annan 01]. Le site connaît des marnages de marée d'une amplitude particulièrement importante, pouvant atteindre jusqu'à $8,2m$ à l'équinoxe de printemps. La cote du plan d'eau oscille ainsi au cours d'un cycle de grande vive eau* entre $4,6m$ and $-3,6m$. Les bancs intertidaux occupent près de $340000ha$ soit environ 12% des estrans de tout le Royaume-Uni. La figure 2.9 montre la bathymétrie du domaine avec, entre les deux limites en traits forts, l'étendue considérable de la zone intertidale.

Pour le forçage hydrodynamique du modèle de la baie, Flather et Heaps ont recours à des modèles imbriqués : un modèle de grande emprise grossièrement maillé calcule les conditions de forçage aux limites d'un second, d'une plus petite emprise incluse dans la

première, et plus finement maillé. Sur ce maillage Flather et Heaps y testent un traitement des zones sèches/mouillées qui est par la suite amélioré [Flather 91] et donne lieu à une seconde modélisation de cette baie. cf fig.1.10

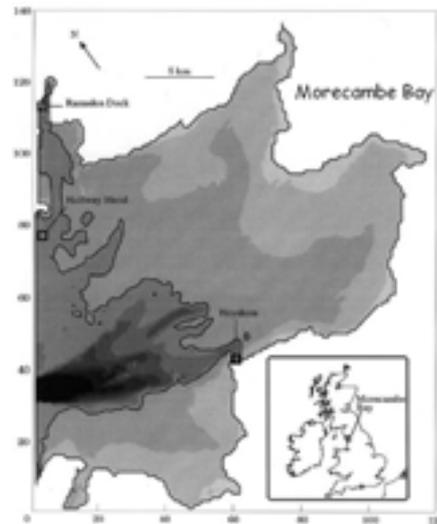


Figure 1.10 : *Morecambe Bay, modèle d'Annan, 2001. Les traits forts représentent les niveaux de pleine et basse mer pour une marée de grande vive eau.*

1.4.2 La Baie de San Francisco

Une autre baie très étudiée est la Baie de San Francisco : la figure 1.11, qui représente sa bathymétrie, montre dans ce cas aussi une large zone peu profonde (profondeur entre 0m et 5m) qui est alternativement couverte et découverte par la marée qui gouverne l'hydrodynamique de la baie. En 1993, Cheng et Casulli [Cheng 93b] y appliquent une version des modèles "TRIM" (Tidal, Residual, Intertidal Mudflat Model, dont Casulli est à l'origine) pour une étude des courants; puis en 1998, Gross et Casulli [Gross 98] appliquent une version plus récente (TRIM-3D) couplé au transport pour simuler l'évolution du champ de salinité en présence des relargages d'eau douce par les usines de traitement des eaux usées, implantées au sud de la baie.

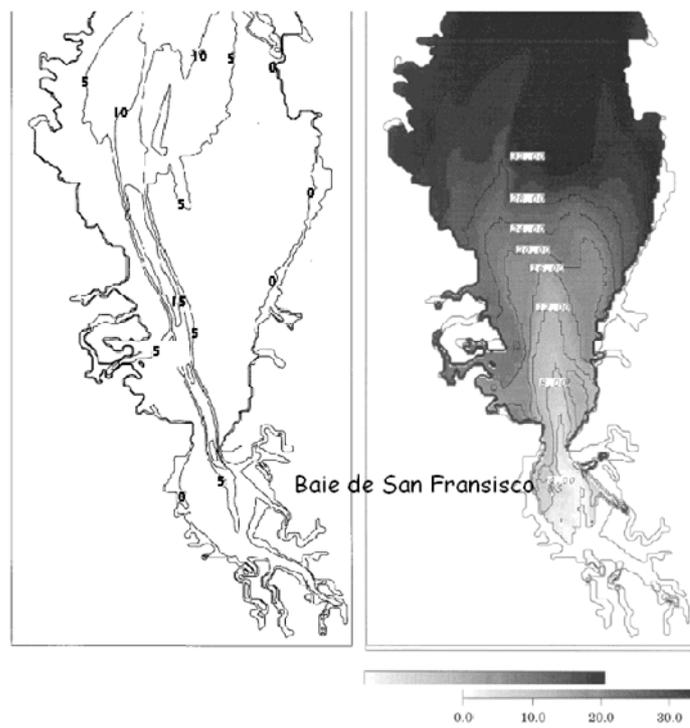


Figure 1.11 : *Sud de la baie de San Francisco : Bathymétrie et champ de salinité calculé après 3,5 jours d'injection d'eau douce. Casulli et al.*

1.4.3 La Baie du Mont-Saint-Michel

En France, la baie du Mont-Saint-Michel connaît les plus forts marnages du pays et l'étendue des estrans est très vaste. On assiste dans la baie à un exhaussement des fonds, particulièrement marqué depuis un demi-siècle [Ehrhold 03]. Ce comblement est nuisible au caractère maritime du site. Ehrhold et al., 2003 [Ehrhold 03], ont cherché à déterminer les flux de sédiments non-cohésifs dans les processus de comblement de la baie. Cette étude des flux sédimentaires en baie du Mont-Saint-Michel combine l'utilisation d'un modèle numérique 2DH résolvant les équations de Saint-Venant et un modèle des transits sédimentaires établi sur l'analyse d'enregistrements d'imagerie acoustique calibrée par un canevas dense de prélèvements sédimentaires. La figure 1.12 cartographie les fonds de la baie, et les flux de sédiments calculés pour un coefficient de marée de coefficient 70.

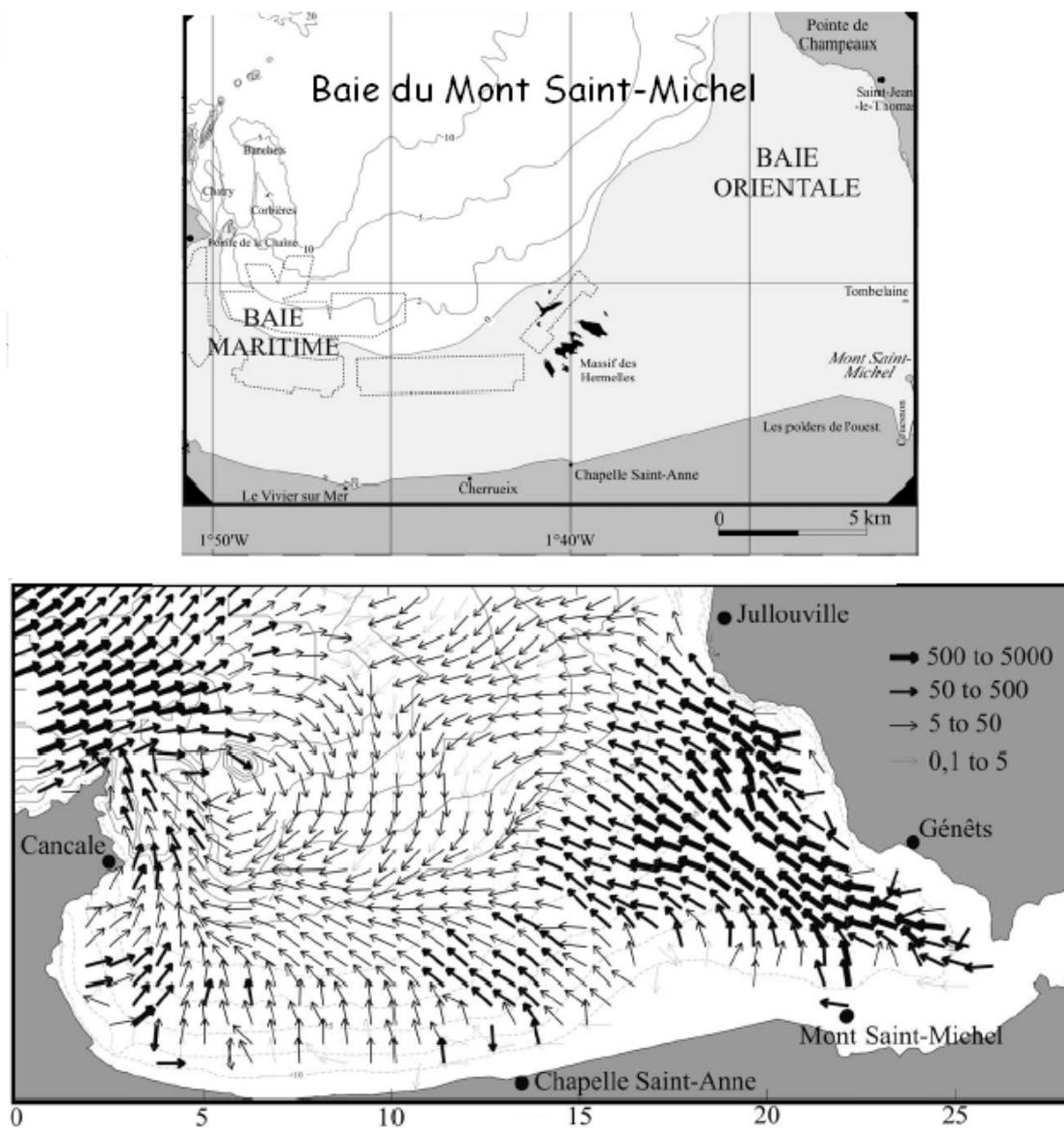


Figure 1.12 : (a) Carte générale de la baie du Mont-Saint-Michel.
(b) Flux de sédiments calculés en baie du Mont-Saint-Michel pour un coefficient de marée de 70 par Erhold et al.

1.4.4 Les modèles 2DH du Bassin d’Arcachon.

Plusieurs modèles hydrodynamiques du Bassin d’Arcachon ont également été développés par le passé [Plus 04] : le modèle physique du service maritime (modèle réduit du bassin, LCFH, 1973) [Collectif 73], les modèles numériques de la SOGREAH (1991) et de Salomon et Breton [Salomon 95]. En 2003, la SOGREAH développe un nouveau modèle dans le cadre d’une étude pour le Syndicat Intercommunal du Bassin d’Arcachon (SIBA) [Collectif 03] : ce modèle utilise le code TELEMAC-2D, vu précédemment. Les études permises par ces modèles ont mis en évidence la grande complexité du système, notamment due à la bathymétrie très hétérogène et à la forte présence de bancs intertidaux. Le travail de thèse de F. Cayocca [Cayocca 96] a bien montré la morphologie très active au niveau des passes par lesquelles le bassin communique avec l’océan. On retire également de ces études que les moteurs hydrodynamiques de la lagune sont la marée et le vent.

IFREMER possède actuellement un modèle issu des travaux de Salomon et Breton [Salomon 95] simulant les écoulements tidaux en présence de vent. C’est le modèle MARS-2D, bidimensionnel, résolvant les équations de Saint-Venant par la méthode des différences finies (schéma ADI). Le forçage du domaine est réalisé au moyen du système de modèles imbriqués disponible dans le logiciel IMARS (SEAMER) : des trois modèles gigognes, le plus vaste fournit les conditions aux limites du second qui fait de même pour le troisième, celui-ci forçant finalement le modèle d’emprise le bassin. Les conditions de forçage météorologique sont fournies par MétéoFrance.

1.5 Conclusion du chapitre

Le travail de recherche de ces trois années s'est effectué, pour sa partie numérique, au laboratoire TREFLE (initialement MASTER), qui développe le code de calcul AQUILON. Ce code traite de nombreux problèmes de mécanique des fluides et de thermique. L'implémentation, en son sein, d'un module pour le calcul de l'hydrodynamique côtière est un objectif de la thèse. Le choix de la méthodologie numérique utilisée lors de nos développements se fait donc parmi celles développées pour la bibliothèque de calcul scientifique Aquilon (cf présentation partie suivante). Cette forte contrainte initiale au développement du modèle se justifie au regard des atouts intrinsèques qu'Aquilon possède et qui laissent présager des potentialités dans notre domaine d'étude, et sera confortée par de la validation du code implémenté au travers de cas-tests théoriques puis des résultats obtenus par la modélisation de l'hydrodynamique d'un site naturel complexe. L'enjeu est de combiner les modalités d'Aquilon afin de réaliser un modèle pour l'hydrodynamique côtière répondant aux exigences fortes mises en évidence par la bibliographie.

Chapitre 2

Nouveau modèle numérique pour l'hydrodynamique côtière

L'objectif de la thèse est de réaliser un modèle pour la simulation des écoulements tidaux en eaux peu profondes, de l'implémenter dans un logiciel préexistant, puis de l'appliquer à un site côtier réel, non idéal: le bassin d'Arcachon.

Ce système lagunaire réunit les difficultés majeures de la modélisation de l'hydrodynamique littorale: une bathymétrie abrupte, très hétérogène, faite de systèmes de chenaux creusant de larges platiers, et la présence forte de bancs intertidaux alternativement émergés, puis submergés par le flot.

On l'a vu, ces caractéristiques sont complexes à prendre en compte numériquement lorsque que l'on souhaite construire un code tout à la fois robuste, précis et efficient. La littérature rend compte d'un grand nombre de développements proposés à cet effet, des améliorations continuellement apportées au traitement des zones sèches sans obtenir entière satisfaction.

A partir de la bibliothèque numérique du code AQUILON, nous avons construit notre propre modèle, associant de manière originale des modèles et des méthodes numériques dans le but de satisfaire au mieux aux exigences fortes exposées précédemment. La validation sur cas tests standards de la littérature montrera dans la partie suivante sa robustesse et sa réponse à ces quatre difficultés, isolément ou simultanément.

Dans cette partie, nous exposons dans un premier temps le modèle physique développé

et expliquons notamment comment un terme de trainée volumique de type Darcy introduit dans les équations de Saint-Venant va permettre de traiter les zones intertidales.

Puis nous présentons très généralement le code de calcul AQUILON, pour décrire ensuite plus précisément les approximations numériques du modèle que nous avons choisies parmi un ensemble de schémas de discrétisation et de résolution préexistant dans le code.

2.1 Le modèle physique

Au regard des exigences spécifiques à la simulation des écoulements tidaux en milieux peu profonds (utilisation de grands pas de temps, gestion de topographies irrégulières et de larges zones intertidales), et des méthodes proposées dans la littérature évoluant pour plus de performance, nous nous fixons un objectif : développer un modèle résolu implicitement, cela bien que la résolution explicite des équations de Saint-Venant soit déjà possible par le code AQUILON.

Doublement contraints par ces exigences propres aux SWE et par le cadre numérique de la bibliothèque d'AQUILON, nous proposons une formulation des équations en eaux peu profondes différente de la classique dite de Saint Venant. En effet, nous y introduisons artificiellement un terme de perméabilité en vue de mettre en place une méthode de pénalisation des écoulements dans les zones émergées.

Partant des équations de Navier-Stokes additionnées d'un terme de Brinkman, nous posons les hypothèses qui conduisent aux équations de Saint-Venant implémentées d'un nouveau terme.

2.1.1 Les équations de Navier-Stokes

Les équations de Navier-Stokes décrivent la mécanique des fluides de manière générale. Sous des hypothèses simplificatives, on peut, à partir de ce système tridimensionnel, retrouver les équations de Saint-Venant, bidimensionnelles.

Notre démarche a consisté à introduire un terme de type Darcy, issu de la modélisation des écoulements en milieux poreux, dans les équations de Navier-Stokes, puis d'intégrer sur la verticale ces nouvelles équations sous les hypothèses particulières des milieux peu profonds.

Rappelons donc le système de Navier-Stokes proprement dit:

Pour un fluide newtonien compressible,

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (2.1)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot (\mu(\nabla \mathbf{V} + \nabla^t \mathbf{V})) \quad (2.2)$$

Où \mathbf{V} est le vecteur vitesse, p la pression, \mathbf{f} un terme source, t le temps, ρ la densité et μ la viscosité dynamique.

2.1.2 Introduction d'un terme de Darcy dans les équations de Navier-Stokes

L'introduction d'un terme de traînée volumique de type Darcy dans l'équation de conservation de la quantité de mouvement du système de Navier-Stokes permet de rendre compte des écoulements dans des systèmes mixtes fluide-milieu poreux. Cette équation du mouvement décrit alors l'écoulement d'un fluide fictif composé d'un fluide newtonien ensemené de particules solides et fixes, de diamètre très inférieur à la distance entre particules. Tout en restant dans cette hypothèse, le rapprochement des particules permet de faire tendre le comportement de ce fluide vers celui du solide; le paramètre indépendant contrôlant cette évolution est la perméabilité κ [Angot 99].

Nous obtenons, après introduction de ce terme de Brinkman, les équations de Navier-Stokes-Brinkman sous leur forme conservative:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (2.3)$$

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot (\mu(\nabla \mathbf{V} + \nabla^t \mathbf{V})) - \frac{\mu}{\kappa} \mathbf{V} \quad (2.4)$$

où:

\mathbf{V} est le vecteur vitesse, p la pression, \mathbf{f} un terme source, t le temps, ρ la densité, μ la viscosité dynamique, ν la viscosité cinématique, κ la perméabilité et $(\nu/\kappa)\mathbf{V}$ le terme de Darcy.

2.1.3 Nouveau système des équations en eau peu profonde

Hypothèses

- Masse volumique constante

On suppose le fluide incompressible à volumique constante, soit :

$$\rho = \text{constante} \quad (2.5)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{V} = 0 \quad (2.6)$$

$$(2.7)$$

De fait, l'équation (2.4) devient :

$$\rho \frac{d\mathbf{V}}{dt} = -\nabla p + \rho \mathbf{g} + \mathbf{f} + \nabla \cdot (\mu(\nabla \mathbf{V} + \nabla^t \mathbf{V})) - \frac{\mu}{\kappa} \mathbf{V} \quad (2.8)$$

- Hypothèse des milieux peu profonds

En faisant cette hypothèse, on suppose les grandeurs selon la verticale très inférieures aux grandeurs horizontales :

$$H \ll L \quad (2.9)$$

$$w \ll u \quad (2.10)$$

$$w \ll v \quad (2.11)$$

où u , v et w sont les composantes horizontales et verticale du vecteur vitesse \mathbf{V} .

- Hypothèse de l'équilibre hydrostatique

On suppose la répartition de la pression hydrostatique, soit :

$$\nabla p = \rho \mathbf{g} \nabla h \quad (2.12)$$

où h est la hauteur d'eau.

- Intégration sur la hauteur d'eau

On intègre ensuite les équations (2.3-2.6) sur la hauteur d'eau et on applique l'approximation d'Agoshkov [Agoshkov 93] qui permet d'écrire que :

$$h \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{V}) = \nabla \cdot (\mu h \nabla \mathbf{V}) \quad (2.13)$$

Ainsi, on aboutit à une nouvelle formulation conservative du système de Saint-Venant.

Nouveau système 2DH

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (h \mathbf{V}) &= 0 \quad (2.14) \\ \frac{\partial (h \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (h \mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) &= -gh \nabla (h + h_b) + \mathbf{f} + \nabla \cdot (\nu h (\nabla \mathbf{V} + \nabla^t \mathbf{V})) - \frac{\nu}{\kappa} (h \mathbf{V}) \quad (2.15) \end{aligned}$$

avec: κ la perméabilité (m^2) et $\frac{\nu}{\kappa} (h \mathbf{V})$ le terme de Darcy modifié.

2.2 Le code AQUILON

2.2.1 Présentation générale

AQUILON est une bibliothèque de modèles et d'outils de discrétisation et de solveurs traitant de nombreux problèmes de mécanique des fluides et de thermique. Il est basé sur le concept original de domaines fictifs, qui reposent sur l'utilisation d'un maillage décalé, déconnecté de la géométrie étudiée, ce qui permet le traitement dans sa globalité d'un milieu hétérogène fluide/solide.

Les équations du mouvement sont approchées sur une grille cartésienne fixe décalée, structurée par la méthode des volumes finis [Patankar 80]. Cette méthode, très bien adaptée à la prise en compte de phénomènes physiques représentés par des systèmes d'équations issus des bilans de conservation (bilans de masse, de quantité de mouvement ou d'énergie), consiste à intégrer les équations du mouvement sous leur forme conservative, ou divergentielle, dans chaque volume de contrôle du maillage.

2.2.2 Compétences

Plus précisément, le code AQUILON est spécialisé dans la modélisation et la simulation numérique d'écoulements diphasiques en présence d'interface : particules/fluide, liquide/fluide, gaz/liquide. Les modèles implémentés dans la bibliothèque permettent de traiter des problèmes de turbulence (DNS, LES), d'écoulement à surface libre, de dynamique moléculaire, de changement de phase, etc. Sont disponibles les équations de Navier-Stokes et l'équation de l'énergie.

Parmi les techniques numériques utilisables on dispose de : Lagrangien augmenté, projections scalaire et vectorielle, transport d'interfaces, VOF-CIAM, VOF-TVD, WENO, Front-Tracking, pénalisation, domaines fictifs, raffinement local adaptatif, solveur itératifs, préconditionneur, parallélisation, etc.

Les domaines d'application sont les écoulements environnementaux et côtiers, les matériaux, les procédés de fabrication par injection.

2.3 Approximation numérique du modèle

C'est à partir de ce pool de compétences que nous cherchons à construire un outil numérique répondant aux exigences de la modélisation des écoulements tidaux en eaux peu profondes.

Nous exposons ici le traitement des équations (cf paragraphe précédent) que nous avons retenu pour y satisfaire.

2.3.1 Les schémas de discrétisation

Discrétisation temporelle

Le système d'équations que l'on souhaite résoudre est tout **d'abord discrétisé en temps**. Le temps de la simulation est discrétisé en un nombre fini d'intervalles $[t^n; t^{n+1}]$, d'égale durée dans notre cas. Les équations sont résolues implicitement, c'est à dire que chacun des termes du système d'équations est traité implicitement. Notre technique consiste à découpler les équations en les résolvant les unes après les autres à chaque itération en temps. De même, les caractéristiques des fluides (masse volumique, viscosité...) sont remises à jour par des relations algébriques à la fin de chaque itération [Glockner 01].

Cette approche implicite permet de s'affranchir de la condition de stabilité de type CourantFriedrichsLewy, dite "CFL". Cette condition s'exprime par une relation entre la vitesse de propagation numérique et la célérité de l'onde : $CFL = \Delta t \sqrt{gH} / \Delta x < 1$, où Δt est le pas de temps et Δx le pas d'espace. Elle impose ainsi une contrainte sur le pas de temps, nécessitant, dans les cas critiques, de diminuer celui-ci afin que la résolution reste stable. En s'affranchissant de cette condition qui lie le pas de temps au pas d'espace, et qui est nécessaire en résolution explicite, on autorise l'emploi de grands pas de temps.

Terme non linéaire

Le terme convectif est non-linéaire par rapport à $\mathbf{q} = h\mathbf{V}$. Pour le résoudre implicitement, on doit l'exprimer par une relation linéaire de l'inconnue \mathbf{q}^{n+1} :

$$\left[\nabla \cdot \left(\mathbf{q} \otimes \frac{\mathbf{q}}{h} \right) \right]^{n+1} \approx \nabla \cdot \left(\mathbf{q}^{n+1} \otimes \left[\frac{\mathbf{q}}{h} \right]^* \right) \quad (2.16)$$

On exprime la vitesse $\left[\frac{\mathbf{q}}{h}\right]^*$ par une approximation d'ordre 1 :

$$\left[\frac{\mathbf{q}}{h}\right]^* = \frac{\mathbf{q}^n}{h^n} = \left[\frac{\mathbf{q}}{h}\right]^{n+1} + o(\Delta t) \quad (2.17)$$

Discrétisation spatiale

Les équations sont **ensuite discrétisées dans l'espace** sur une grille cartésienne décalée en vitesse/pression de type MAC (Marker and Cell). Les variables scalaires (hauteur, pression, température, concentration, etc.) sont calculées sur une grille principale. A partir de cette grille est construite une grille pour le champ de vitesse, décalée dans chacune des directions de l'espace. La figure 2.1 représente cette architecture. Le calcul du gradient de pression et de la divergence de la vitesse est facilité par la structure de ce maillage décalé. Cela permet d'éviter les oscillations en hauteur observées pour un maillage non décalé [Patankar 80].

Les équations locales sont intégrées sur chaque volume de contrôle. En intégrant le terme convectif, il faut déterminer, à l'aide d'un schéma d'advection, la valeur de la variable en question au niveau des interfaces où elle n'est pas définie. La nature du schéma influence fortement le résultat final. Les plus classiques sont les schémas centrés, upwind, hybrides, quick ou double amont, disponibles dans AQUILON. Chacun d'eux est une approximation et dénature l'équation de transport. Le schéma upwind d'ordre 1 diffuse fortement à l'approche des forts gradients, alors que le schéma quick, d'ordre 2, est moins sensible à ce problème mais oscille assez fortement. Le schéma centré, d'ordre 2, est rapidement instable à proximité des forts gradients [Glockner 01].

Dans notre cas, un schéma Upwind d'ordre 1 est dédié à la discrétisation des termes convectifs non-linéaires du système (3.14 - 3.15). Bien que ses défauts soient connus, nous avons choisi de l'implémenter pour sa simplicité et son comportement monotone. Le chapitre suivant, qui traite de la validation du modèle sur des cas tests, démontrera l'intérêt de ce choix pour la simulation des écoulements en milieux peu profonds. Pour des cas de profils de hauteurs d'eau discontinus ou particulièrement irréguliers, l'ordre de précision pourra être augmenté par l'implémentation de schémas TVD (Total Variation Diminishing) implicites ou de schémas WENO (Weighted Essentially Non-Oscillating) décrits, par exemple, dans [Harten 87, Jiang 96].

Pour le gradient de la hauteur d'eau et le terme visqueux, un schéma centré d'ordre 2 est

choisi.

Conditions aux limites

Afin de trouver une solution particulière d'un problème posé à partir des équations de continuité et de quantité de mouvement, il est nécessaire de fixer les conditions aux limites mécaniques ainsi que les conditions initiales des diverses variables.

Le concept de maillage unique requiert la possibilité de pouvoir imposer à chaque itération, et en tout point du domaine de calcul, des conditions de contrôle de la maille. Les équations aux limites sont intégrées aux équations grâce à des termes supplémentaires. Concrètement, cela se traduit par l'apport d'une condition aux limites de flux surfacique de type Fourier directement dans les équations. Ainsi l'équation (2.15) devient :

$$\frac{\partial(h\mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (h\mathbf{V} \otimes \mathbf{V}) = -gh\nabla(h+h_b) + \mathbf{f} + \nabla \cdot (\nu h(\nabla\mathbf{V} + \nabla^t\mathbf{V})) - \frac{\nu}{\kappa}(h\mathbf{V}) - (Bi(h\mathbf{V} - h\mathbf{V}_\infty) + \varphi) \quad (2.18)$$

Où Bi représente un coefficient d'échange surfacique propre à la grandeur \mathbf{V} , \mathbf{V}_∞ une valeur de référence adaptée au problème, φ un flux surfacique.

Suivant les valeurs du nombre Bi sur les noeuds frontières du domaine, les conséquences sur la condition à la limite imposée, seront les suivantes :

$Bi = 0$	Condition de Neumann homogène	$\frac{\partial\phi}{\partial n}$
$Bi \rightarrow \infty$	Condition de Dirichlet	$\phi = \phi_\infty$
$Bi = 0$ et $\varphi \neq 0$	Flux surfacique imposé	

Cette formulation nous permet de modifier très facilement les conditions aux limites et de représenter un large éventail de condition aux limites : paroi solide, obstacle solide dans le domaine, symétrie, adhérence ou glissement.

2.3.2 Résolution du couplage vitesse-hauteur

Un des problèmes rencontrés lorsque l'on résout les équations de Saint-Venant exprimées en variables primitives vitesse-hauteur d'eau (issues des équations de Navier-Stokes

exprimées en variables primitives vitesse-pression) concerne le traitement du couplage entre les deux quantités vitesse et hauteur.

Pour leur résolution nous utilisons une méthode robuste, adaptée aux écoulements compressibles et directement inspirée de l'algorithme du "Lagrangien augmenté" (LA). Nous allons ici décrire l'origine et les principes du LA en incompressible. Ensuite, nous exposerons l'adaptation que nous avons faite du LA en compressible (équations de Saint-Venant dans notre cas) dans laquelle on retient l'idée d'intégration de l'équation de continuité dans l'équation de quantité de mouvement.

Origine de la méthode du "Lagrangien augmenté" en incompressible

Le problème majeur des équations de Navier-Stokes est le traitement du couplage entre la pression et la vitesse. La difficulté réside dans le fait de calculer un champ de pression résultant d'un écoulement incompressible avec \mathbf{V} qui vérifie l'équation de continuité, le tout sans disposer d'équation traduisant de manière explicite les évolutions de la pression.

En incompressible, plusieurs méthodes de résolution existent, dont la relativement récente méthode dite du "Lagrangien augmenté" implémentée dans AQUILON. Cet algorithme a été élaboré dans un premier temps dans le but de résoudre le couplage vitesse/pression induit par les équations de Navier-Stokes écrites pour un écoulement incompressible.

Il repose sur une méthode de minimisation sous la contrainte de l'équation de continuité, où la pression, découplée par rapport à la vitesse, apparaît comme un multiplicateur de Lagrange [Fortin 82].

La contrainte est en fait directement introduite dans l'équation du mouvement sous la forme du terme de pénalisation $-r\nabla(\nabla \cdot \mathbf{V})$ qui couple les différentes composantes de la vitesse. Le calcul du couple vitesse-pression est effectué par l'algorithme itératif d'Uzawa [Fortin 82, Glockner 01]. Les itérations de lagrangien augmenté (notées k) sont répétées jusqu'à ce que la valeur moyenne de la divergence de la vitesse, dans l'ensemble du domaine, soit suffisamment petite. En notant K le nombre maximal d'itérations nécessaires pour satisfaire le précédent critère, l'algorithme itératif du Lagrangien augmenté est explicité ci-dessous.

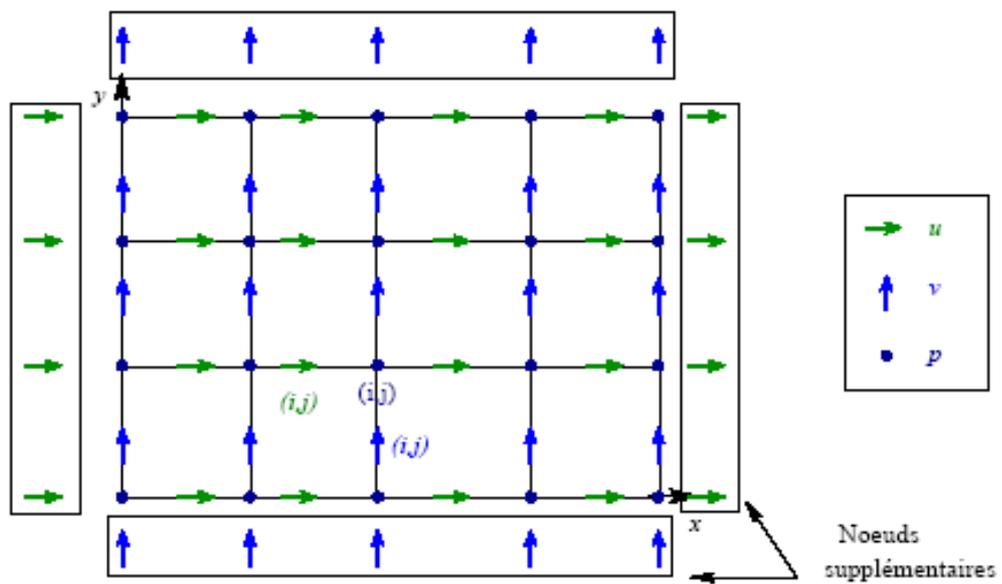


Figure 2.1 : *Représentation du maillage décalé.*

Algorithme de résolution en incompressible

«- **Initialisation** : $\mathbf{V}^{k=0} = \mathbf{V}^n$, $p^{k=0} = p^n$

«- **Itérations** : Pour $k = 0$ à $K - 1$, on fait :

.*Calcul de \mathbf{V}^{k+1}* comme la solution de l'équation :

$$\rho^n \left(\frac{\mathbf{V}^{k+1}}{\Delta t} + \mathbf{V}^k \cdot \nabla \mathbf{V}^{k+1} \right) = \rho^n \mathbf{g} - \nabla p^k + \nabla \cdot [\mu^n (\nabla \mathbf{V}^{k+1} + \nabla^t \mathbf{V}^{k+1})] + \rho^n \left(\frac{\mathbf{V}^n}{\Delta t} \right) + r \nabla (\nabla \cdot \mathbf{V}^{k+1}).$$

.*Calcul de p^{k+1}* à partir de l'équation :

$$p^{k+1} = p^k - r \nabla \cdot \mathbf{V}^{k+1} .$$

«- **Solutions** : $\mathbf{V}^{n+1} = \mathbf{V}^{k=K}$ et $p^{n+1} = p^{k=K}$.

Méthode adaptée pour un écoulement compressible

Directement inspirée de cet algorithme du Lagrangien augmenté pour les écoulements incompressibles, une méthode de résolution des équations valable pour les écoulements compressibles est développée dans AQUILON [Figué 96]. Il s'agit cette fois de coupler la masse volumique et la quantité de mouvement par l'introduction de l'équation de conservation de la masse dans celle de la quantité de mouvement.

Considérant les équations de Navier-Stokes, la pression p est fonction des deux variables d'état ρ et T , et on exprime le gradient de la pression :

$$\nabla p = \left(\frac{\partial p}{\partial \rho} \right)_T \nabla \rho + \left(\frac{\partial p}{\partial T} \right)_\rho \nabla T \quad (2.19)$$

Cette expression est directement introduite dans l'équation du mouvement. L'équation de continuité $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0$ discrétisée en temps devient :

$$\frac{\rho^{n+1} - \rho^n}{\Delta t} + \nabla \cdot (\mathbf{q}^{n+1}) = 0 \quad (2.20)$$

Soit :

$$\rho^{n+1} = \rho^n - \Delta t \nabla \cdot (\mathbf{q}^{n+1}) \quad (2.21)$$

A cette dernière équation, on applique l'opérateur gradient :

$$\nabla \rho^{n+1} = \nabla \rho^n - \Delta t \nabla (\nabla \cdot \mathbf{q}^{n+1}) \quad (2.22)$$

avec Δt le pas de temps entre deux itérations successives n et $n + 1$ [Figué 96].

Depuis l'état initial (n), on obtient \mathbf{q}^{n+1} , puis $\mathbf{V}^{n+1} = \mathbf{q}^{n+1}/\rho^n$, quant à ρ^{n+1} , il est obtenu par réactualisation grâce à [2.21]. **Il ne s'agit donc plus ici d'un algorithme de minimisation comme dans le cas des écoulements incompressibles.**

Application aux équations de Saint-Venant

Afin de simplifier la notation, les termes de friction de Brinkman et le terme visqueux n'apparaissent pas dans la démonstration. Ici, $\mathbf{q} = h\mathbf{V}$ est le débit hydraulique et le couplage $h/h\mathbf{V}$ est l'analogie du couplage $\rho/\rho\mathbf{V}$ résolu par la méthode adaptée aux écoulements compressibles et présentée précédemment.

Le système en eau peu profonde s'écrit :

$$\frac{\partial \mathbf{q}}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{q}\mathbf{v}) = -gh\nabla(h_b + h) \quad (2.23)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot \mathbf{q} = 0 \quad (2.24)$$

Le système [2.23-2.24] est discrétisé en temps grâce à un schéma d'Euler du premier ordre, mais la méthode reste valide pour des ordres supérieurs.

$$\frac{\mathbf{q}^{n+1} - \mathbf{q}^n}{\Delta t} + \nabla \cdot (\mathbf{q}^{n+1}\mathbf{v}^n) = -gh^n\nabla(h_b + h^{n+1}) \quad (2.25)$$

$$\frac{h^{n+1} - h^n}{\Delta t} + \nabla \cdot (\mathbf{q}^{n+1}) = 0 \quad (2.26)$$

Le gradient de hauteur d'eau ∇h^{n+1} peut être exprimé en appliquant l'opérateur gradient à l'équation de conservation discrétisée [2.26]. On obtient alors :

$$\nabla h^{n+1} = \nabla h^n - \Delta t \nabla (\nabla \cdot \mathbf{q}^{n+1}) \quad (2.27)$$

Soit encore :

$$-gh^n\nabla(h_b + h^{n+1}) = -gh^n\nabla(h_b + h^n) + gh^n\Delta t\nabla(\nabla \cdot \mathbf{q}^{n+1}) \quad (2.28)$$

La substitution par cette expression [2.28] du second membre de l'équation de la quantité de mouvement [2.25] permet de faire apparaître deux termes. L'un reste au second membre ($-gh^n\nabla(h_b + h^n)$), l'autre ($+gh^n\Delta t\nabla(\nabla \cdot \mathbf{q}^{n+1})$) sera transposé dans le premier membre.

Le système discrétisé [2.25-2.26] s'écrit alors :

$$\begin{aligned} \frac{\mathbf{q}^{n+1} - \mathbf{q}^n}{\Delta t} + \nabla \cdot (\mathbf{q}^{n+1}\mathbf{v}^n) - gh^n\Delta t\nabla(\nabla \cdot \mathbf{q}^{n+1}) &= -gh^n\nabla(h_b + h^n) & (2.29) \\ h^{n+1} &= h^n - \Delta t\nabla \cdot \mathbf{q}^{n+1} & (2.30) \end{aligned}$$

Nous avons ainsi réussi à réduire à une seule inconnue \mathbf{q}^{n+1} l'équation [2.29] et c'est cette équation qui est résolue. On obtient la vitesse par la relation $\mathbf{V}^{n+1} = \mathbf{q}^{n+1}/h^n$. Enfin, l'équation [2.30] permet la réactualisation de h^{n+1} .

Algorithme de résolution du système des équations de Saint-Venant

La mise en oeuvre numérique de la résolution du système [2.29-2.30] est la suivante :

«- **Initialisation** : $h^0, \mathbf{q}^0 \rightarrow \mathbf{V}^0 = \mathbf{q}^0/h^0$

«- On suppose h^n, \mathbf{q}^n connus; on résout [2.29] pour obtenir \mathbf{q}^{n+1} .

«- La vitesse est calculée comme $\mathbf{V}^{n+1} = \mathbf{q}^{n+1}/h^n$

«- Enfin, on réactualise la hauteur h^{n+1} par $h^{n+1} = h^n - \Delta t\nabla \cdot \mathbf{q}^{n+1}$ [2.30].

«- Les variables à l'itération $n + 1$ sont toutes connues et l'on peut résoudre l'état de l'écoulement à l'itération suivante $n + 2$.

Il n'y a plus de boucle itérative à l'intérieur de l'itération (n+1). De la méthode du LA en incompressible, seule est retenue l'idée d'appliquer l'opérateur gradient à l'équation de continuité pour exprimer ∇h^{n+1} en fonction de \mathbf{q}^{n+1} , puis d'inclure cette expression dans l'équation de quantité de mouvement.

De nombreux cas tests, y compris pour des solutions analytiques, ont permis de valider la technique présentée ici pour les écoulements en eaux peu profondes.

Résolution numérique du nouveau système

Notre approche implicite conduit à la résolution de systèmes linéaires nécessitant l'utilisation de préconditionnements et de solveurs performants. Les systèmes linéaires provenant de la discrétisation des équations sont extrêmement creux [Glockner 01].

Le grand système linéaire creux obtenu nécessite un préconditionnement et des solveurs efficaces et puissants, dont AQUILON est doté.

La discrétisation implicite évoquée plus haut implique la définition d'une équation algébrique linéaire qui sera résolue à chaque itération :

$$\mathbf{A} \cdot \mathbf{X} = \mathbf{F} \quad (2.31)$$

$$\text{où } \mathbf{X} = \begin{pmatrix} (h\mathbf{V})^{n+1} \\ (h)^{n+1} \end{pmatrix}$$

\mathbf{A} est la matrice des coefficients de discrétisations spatiale et temporelle et \mathbf{F} contient les termes source. Résoudre l'équation 2.31 nécessite l'inversion de \mathbf{A} . La résolution se fait au moyen d'un algorithme du bi-gradient conjugué stabilisé (BiCGSTAB II) de Van Der Vorst [van der Vorst 92]. L'utilisation de la méthode de préconditionnement MILU (Modified and Incomplete LU) appliquée à la matrice \mathbf{A} permet d'accroître la convergence et est très utile pour les écoulements complexes autour d'obstacles où un simple préconditionnement de type Jacobi peut s'avérer insuffisant ou beaucoup plus long à converger.

2.4 Méthode de pénalisation pour les zones intertidales

2.4.1 Les zones intertidales

Une difficulté principale à l'application des équations de Saint-Venant au calcul des écoulements côtiers est due à la présence de régions très peu profondes dans le domaine modélisé.

En effet, ces zones, dites zones intertidales, sont soumises aux oscillations du niveau d'eau provoquées par la marée notamment, mais aussi, dans une moindre mesure, par les conditions climatiques (pression atmosphérique, vent). Elles sont, de ce fait, successivement couvertes (mouillées) ou découvertes (sèches) par la mer.

Une reproduction précise de ce phénomène est cruciale pour une description correcte des processus sédimentaires encore mal connus [Hir 00] dans ces régions. Ainsi, le traitement numérique de ces zones couvrantes et découvrantes est un enjeu essentiel de la modélisation des écoulements littoraux, en eaux peu profondes. Cela est particulièrement vrai lorsque l'on considère le Bassin d' Arcachon, dont les bancs intertidaux représentent 70% de la superficie [Plus 04]!



Figure 2.2 : Photographies de bancs émergents dans le bassin d'Arcachon (zone des passes): les bancs du Toulinguet (cliché du haut) et d'Arguin (cliché du bas).

Au niveau de l'interface entre la zone mouillée et la zone sèche, de forts gradients de vitesses peuvent apparaître [Carrier 57, Hibbert 79] qui nécessitent des méthodes numériques robustes. Mais, comme le met en évidence Balzano [Balzano 98] dans sa revue des traitements numériques des Wetting And Drying (**WAD**, pour immersion/émergence) par des schémas implicites (ADI), beaucoup de ces méthodes robustes sont alors limitées par le calcul de lignes d'eau aberrantes physiquement, et sont génératrices de pertes de masse ou d'instabilités numériques.

Pour le traitement des zones sèches, nous proposons l'approche suivante : leur caractérisation est assurée par une méthode de pénalisation tandis que l'évolution de l'interface eau-banc découvrant peut être obtenue par deux techniques différentes.

2.4.2 Méthode de pénalisation

Revenons au terme de perméabilité $-\frac{\nu}{\kappa}(h\mathbf{V})$ introduit dans les équations (2.14 - 2.15) du nouveau système en eau peu profonde : en faisant tendre κ tend vers l'infini ou zéro, on fait tendre le comportement du milieu vers celui d'un milieu idéal, soit pur fluide, soit pur solide. C'est en jouant sur les valeurs extrêmes de κ que l'on va imposer une vitesse nulle dans la région émergée. Cette technique est appelée méthode de pénalisation [Khadra 00].

Dans la zone "sèche", l'écoulement est totalement figé lorsque l'on impose une valeur extrêmement faible à la perméabilité $\kappa = 10^{-40}$. La hauteur d'eau est, quant à elle, fixée à la valeur seuil ϵ .

Dans la zone immergée, la perméabilité est imposée à $\kappa = 10^{+40}$: le terme de perméabilité rajouté aux équation classiques de SV devient négligeable et le système résolu est similaire au système SV standart.

Comme la topologie de la zone sèche change au cours du temps, la perméabilité doit être réactualisée à chaque itération. Pour ce faire, nous introduisons une fonction de phase C et proposons deux méthodes présentées ci-dessous : son advection ou son traitement direct par un calcul explicite.

2.4.3 Fonction de phase

Par analogie avec les techniques utilisées dans la modélisation des écoulements à surface libre [Scardovelli 99], le repérage de l'interface entre zones émergées et zones immergées requiert l'introduction d'une nouvelle variable appelée fonction de phase C . Notre

approche des WAD consiste à calculer l'évolution spatiale et temporelle de cette fonction $C(x, y, t)$.

Sur une grille de maillage cartésienne, le champ de la fraction volumique $C(x, y, t)$ définit la topologie de l'écoulement. En convenant que D_w indique la région immergée, D_d la région émergée et ∂D_i l'interface entre ces deux milieux, pour $M(x, y, t)$ un point du domaine, la fonction de phase équivalente est définie par l'expression suivante :

$$\begin{cases} C(x, y, t) = 0 & \text{si } M \in D_w \\ C(x, y, t) = 1 & \text{si } M \in D_d \\ C(x, y, t) \in]0,1[& \text{si } M \in \partial D_i \end{cases}$$

A chaque valeur de C , on fait correspondre une valeur de κ infiniment faible ou infiniment grande, de sorte que l'on pénalise l'écoulement ou qu'on le laisse libre.

$$\text{Ainsi, on a } \kappa = \begin{cases} 10^{-40} & \text{si } C < 0,5 & \text{écoulement } \textit{penalise} \\ 10^{+40} & \text{si } C > 0,5 & \text{écoulement } \textit{libre} \end{cases}$$

Afin de traiter au mieux les diverses situations rencontrées dans les benchmark ou dans la nature, deux méthodes ont été implémentées dans le code.

Advection de l'interface

La fonction de phase C peut être obtenue par la résolution d'une équation d'advection $\frac{\partial C}{\partial t} + \mathbf{V} \cdot \nabla C = 0$ avec des méthodes VOF (Volume Of Fluid) [Scardovelli 99], des schémas TVD (Total Variation Diminishing) [Vincent 99], du suivi d'interface (Front Tracking) [Shin 99], level set [Sussman 99]. La seconde méthode propose un traitement direct, basé sur les techniques courantes utilisées pour le traitement numérique du processus d'émergence/immersion.

Dans le cadre de la thèse et du développement du code, nous utilisons ce dernier traitement, direct, mais à terme l'utilisation d'une équation d'une équation, adjointe à une technique de raffinement de maillage local, permettra de garantir une meilleure conservation de la masse.

Traitement direct

Cette méthode est similaire aux techniques courantes pour le traitement numérique du processus d'émergence/immersion. La fonction de phase est explicitement obtenue comme suit : $C = \left(\frac{\epsilon}{h}\right)^n$ avec $\epsilon \xrightarrow{\epsilon \neq 0} 0$ et $n > 1$. N'étant pas basée sur une advection explicite de la fonction de phase, elle autorise l'utilisation de grand pas de temps.

2.4.4 Calcul de la ligne d'eau

Soient $h_{i,j}$ la hauteur d'eau, $h_{bi,j}$ la cote du fond, $z_{i,j}$ la cote de la surface libre et ϵ la valeur-seuil minimum pour la hauteur d'eau. On a donc $z_{i,j} = h_{i,j} + h_{bi,j}$. Pour alléger l'écriture, on notera "sec" un point de la zone émergée (sèche), correspondant à $h_{i,j} = \epsilon$, et "mouillé" un point de la zone immergée (mouillée), correspondant à $h_{i,j} > \epsilon$. A chaque itération, après la résolution implicite du nouveau système de Saint-Venant, le traitement suivant est appliqué sur le domaine entier :

- (1) si $h_{i,j} \ll \epsilon$, on impose la valeur seuil minimum dans la zone sèche : $h_{i,j} = \epsilon$
- (2) Si le point considéré est "sec" ($h_{i,j} = \epsilon$) et possède au moins un voisin "mouillé" dont la cote est supérieure à la sienne ($h_{k,l} > \epsilon$ et $z_{k,l} > z_{i,j}$), alors $z_{i,j}$ prend la valeur de celle de ce voisin "mouillé" ($z_{i,j} = z_{k,l}$).
- (3) Si le point considéré est "mouillé" ($h_{i,j} > \epsilon$) et possède au moins un voisin "sec", alors $z_{i,j}$ prend pour valeur la moyenne des cotes de tous ses voisins "mouillés".

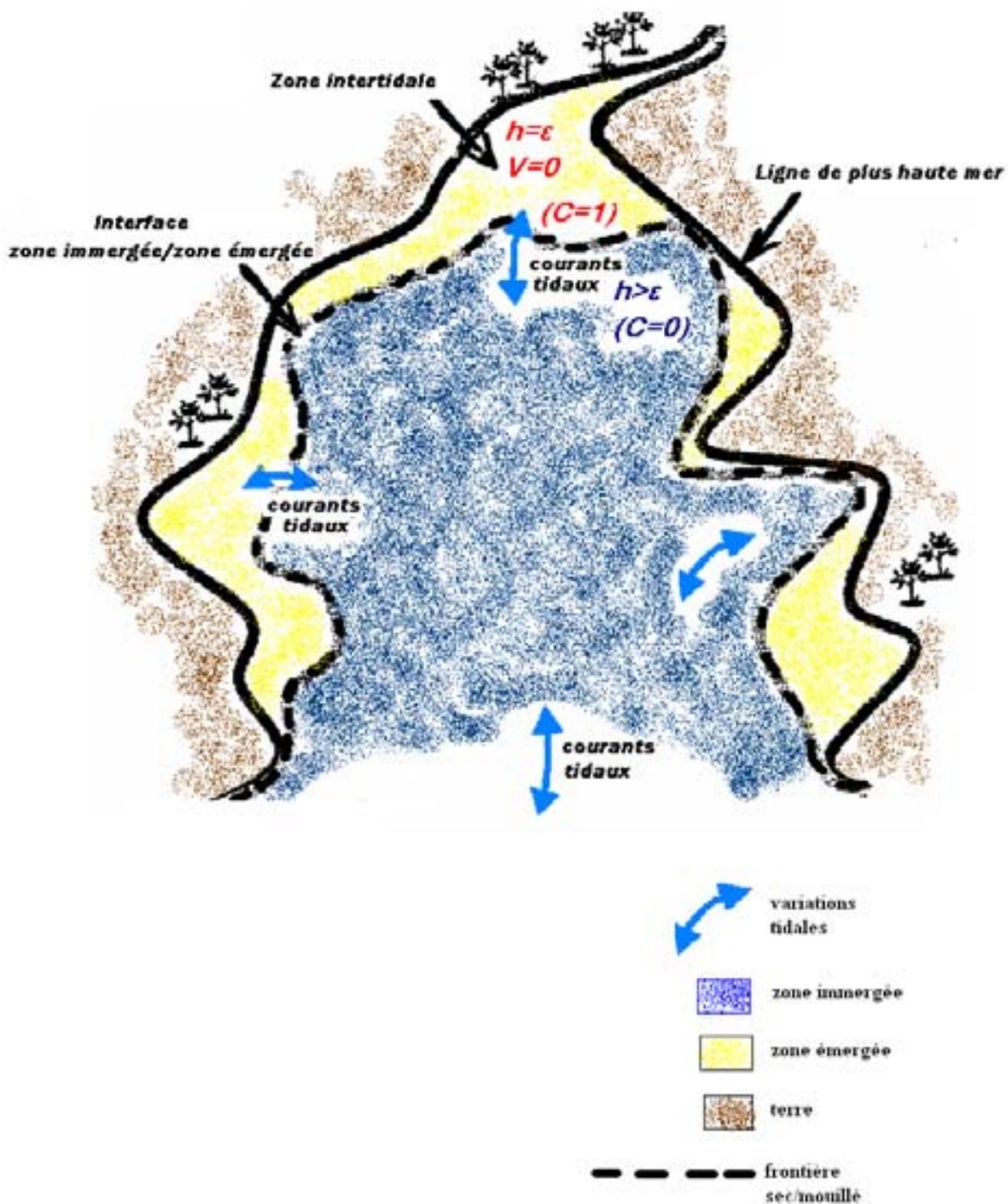


Figure 2.3 : Schématisation du traitement des zones intertidales : frontière zone sèche/zone mouillée repérée par la fonction de phase C .

2.5 Conclusion du chapitre

Ainsi, nous proposons un modèle physique basé sur les équations de Saint-Venant modifiées d'un terme de type Darcy et nous approchons le système sur une grille cartésienne fixe décalée, structurée par la méthode des volumes finis.

Les zones intertidales, repérées par une fonction de phase, sont traitées par une méthode de pénalisation. Deux techniques sont possibles pour le calcul de cette fonction : la résolution d'une équation d'advection, ou moins coûteux, un calcul direct en fonction de la hauteur d'eau dans la maille.

Notre calcul de la ligne d'eau, classique, permet d'éliminer le piégeage numérique de nombreuses flaques d'eau pendant le drainage des bancs intertidaux en jusant. Cependant, il induit une modification du bilan de masse du fait de l'intervention artificielle du niveau de la surface libre. Le code n'est donc plus conservatif, et des améliorations seront à proposer pour observer la conservation de la masse.

Chapitre 3

Validation sur des cas tests théoriques

Notre outil numérique pour la modélisation de l'hydrodynamique côtière, qui combine des méthodes numériques de façon originale, doit être validé sur des cas tests académiques avant d'être appliqué à un site réel du littoral. C'est-à-dire que, partant d'une même situation initiale, on compare les résultats issus de la simulation des écoulements obtenus par notre outil aux solutions analytiques connues pour ce cas, ou aux solutions de référence d'un code validé par des données expérimentales.

On procède de la sorte sur un ensemble de cas tests choisis parmi la littérature traitant des écoulements en eaux peu profondes. On vérifie ainsi la réponse de notre code aux quatre contraintes essentielles qui ont orienté les choix de son développement : la stabilité et la robustesse de la résolution en présence d'écoulements critiques, la gestion des bathymétries fortement irrégulières, le traitement du processus d'émergence/immersion, puis les deux simultanément en utilisant des grands pas de temps. Une attention particulière est portée au choix de situations qui, par leurs dimensions et leurs temps caractéristiques, sont proches des sites côtiers réels dont les écoulements gouvernés par la marée et qui sont susceptibles d'être modélisés par notre code.

3.1 Bathymétrie irrégulière

Une première question, qui a donné naissance au milieu des années 90 à la notion de schéma équilibre - ou well balanced scheme - est liée à la présence, dans le système de Saint-Venant, d'un terme source topographique. Ce terme est en effet à l'origine de difficultés numériques liées à l'existence d'états stationnaires non triviaux [Audusse 04].

Notre méthode implicite n'a pas nécessité de traitement numérique spécifique pour ce terme, contrairement aux schémas explicites [Tseng 04]. Pour vérifier son comportement en présence d'un terme source de topographie, nous reproduisons le cas test proposé par Tseng [Tseng 04] et Vazquez-Cendon [Vazquez-Cendon 99] : un écoulement stable au-dessus d'un fond irrégulier 3.1. Ce cas test permet d'éprouver la capacité du modèle à gérer les bathymétries fortement irrégulières. Du fait de la simplicité, pour cet écoulement stationnaire, de la solution analytique du débit (débit constant partout dans le domaine de calcul), de la hauteur et donc de la vitesse, les erreurs numériques sont facilement repérées et évaluées.

3.1.1 Description

On modélise un canal de $1500m$ de long, de fond irrégulier. La topographie et les solutions exactes sont extraites de l'article de Tseng [Tseng 04]. En amont est introduit un débit constant, d'une valeur de $0,75m^3/s$. En aval, une condition limite de type Neuman (flux nul) est imposée à $x = 1500m$. Le plan d'eau uniforme est initialement à la cote de $15m$ (cf Fig. 3.1). Comme lors des simulations menées par Tseng, le domaine comporte 500 mailles et le pas de temps est fixé à $1s$. Une loi de frottement quadratique est implémentée dans l'équation de quantité de mouvement, et s'exprime comme suit : $C_f \mathbf{V} \|\mathbf{V}\|$. Le coefficient de friction sur le fond vérifie la loi de Strickler : $C_f = g/(K^2 h^{1/3})$ où K est le coefficient de Strickler, constant. Ici, nous prenons la valeur proposée par la littérature $K = 30$.

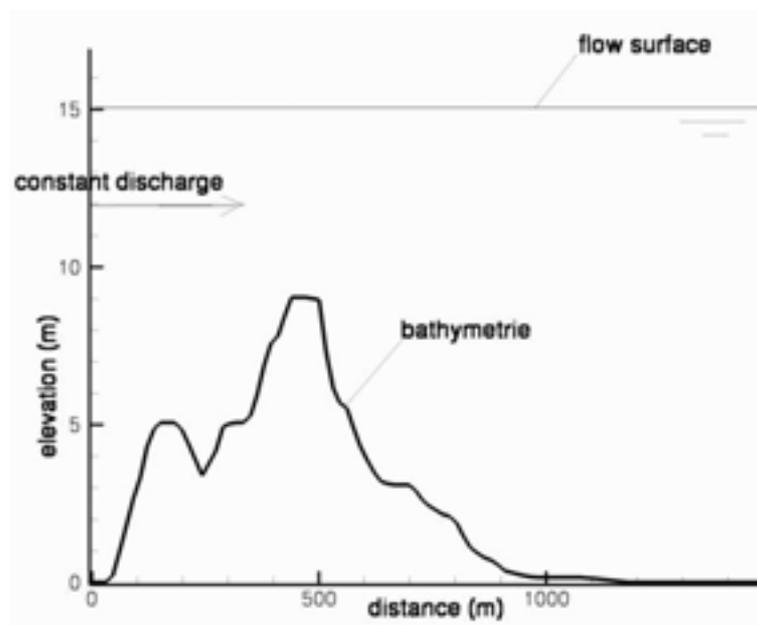


Figure 3.1 : *Instant initial: canal à fond irrégulier, sous débit constant.*

3.1.2 Résultats

Les résultats analytiques sont : un débit $(h.u)(x, t) = 0,75m^3/s$ constant en tout point du domaine, la surface libre à la cote constante de $15m$. On en déduit naturellement la vitesse connaissant le débit et l'élévation du fond en tout point. Les figures 3.2 a,b,c montrent les variations de la cote de la surface libre, du débit et de la vitesse horizontale, simulées par notre modèle et calculées analytiquement. Il y a un très bon accord entre résultats numériques et analytiques, avec des maxima d'erreur inférieurs respectivement à: $10^{-3}m$, $0.05m^2/s$ et $10^{-3}m/s$, soient des erreurs relatives faibles.

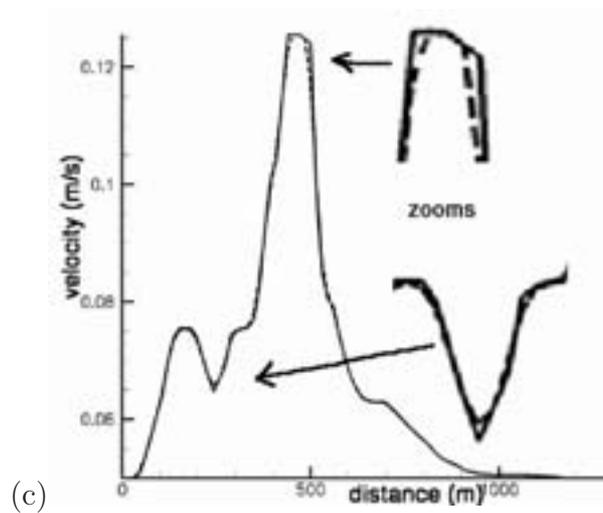
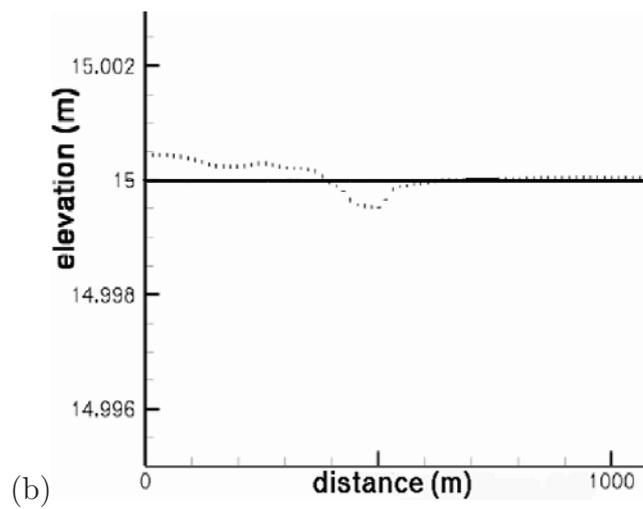
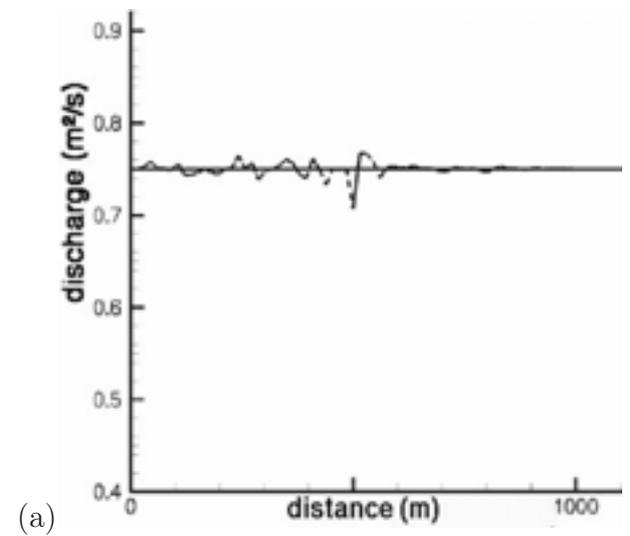


Figure 3.2 : comparaison des profils de débit (a), de hauteur (b), de vitesse (c), simulés (pointillés) et analytiques (trait plein).

3.2 Zones intertidales

Comme on l'a vu précédemment, la gestion numérique des zones intertidales, alternativement sèches puis submergées sous l'action de la marée, est un enjeu majeur de la recherche en modélisation des écoulements côtiers. Dans l'optique de simuler la propagation de la marée dans une lagune aussi complexe que le Bassin d'Arcachon, dont les zones intertidales représentent 70% de la superficie totale de la baie, c'est une priorité qui a orienté les développements proposés dans la partie précédente. Dans son article paru en 1998 [Balzano 98], Balzano propose plusieurs cas-tests liés aux problématiques de "wetting and drying" rencontrées par la modélisation de l'hydrodynamique côtière. Ces cas tests permettent de juger des capacités des modèles numériques à traiter précisément ces situations qui sont sources de difficultés numériques. Afin de juger du comportement de notre propre code, nous les avons repris et proposons ici de présenter les simulations que nous avons réalisées dans les mêmes conditions et pour les mêmes paramètres numériques (pas de temps, maillage) que l'auteur. Les résultats du modèle pourront ainsi être comparés à ceux des nombreux schémas testés par Balzano, dont il met en lumière les faiblesses [Balzano 98]. En effet l'objet de l'article de Balzano est d'évaluer sept traitements numériques différents des processus d'immersion ou d'assèchement des bancs intertidaux, chacun implémenté dans un code semi-implicite aux différences finies (EL) [Balzano 96]. On a dès lors l'occasion de confronter nos résultats à ceux issus des méthodes : **LEE** proposée par Leendertse, 1987 et Stelling et al. [Stelling 86], **BEA** proposée par Benque et al. [Benque 82], **STE** proposée par Stelling [Stelling 84], **SEA** une troisième méthode proposée par Stelling et al., 1986 [Stelling 86], **FAO** proposée par Falconer and Owens [Falconer 87], **MLU** proposée par Casulli and Cheng [Casulli 93], et enfin **MEA** proposée par Molinaro et al. [Molinaro 94].

3.2.1 Plage plane

On considère dans un premier temps un cas simple, proposé par Balzano et similaire à celui testé par Falconer and Owens [Falconer 87]. Un bassin infiniment large de $13800m$ de long présente un fond plan incliné situé à l'isobathe $-5m$ à la frontière ouverte du domaine et à l'isobathe $0m$ à la frontière opposée. Comme pour les simulations de Balzano [Balzano 98], la taille de la maille est de $1200m$ et le frottement est pris en compte, exprimé selon la formule du Strickler (fonction du carré de la vitesse moyennée sur la verticale, loi quadratique) avec pour valeur du coefficient de Strickler $K = 30$. A la frontière liquide du

domaine, une variation de la cote du plan d'eau est imposée, qui suit une loi sinusoïdale d'amplitude $2m$ et de période $43200s$ pour s'approcher des conditions d'une marée semi-diurne*. Le pas de temps est pris identique à celui choisi par Balzano, soit $\delta t = 600s$.

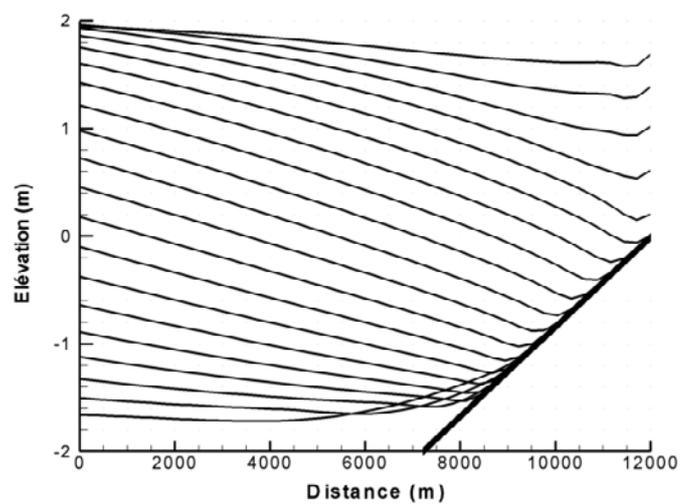
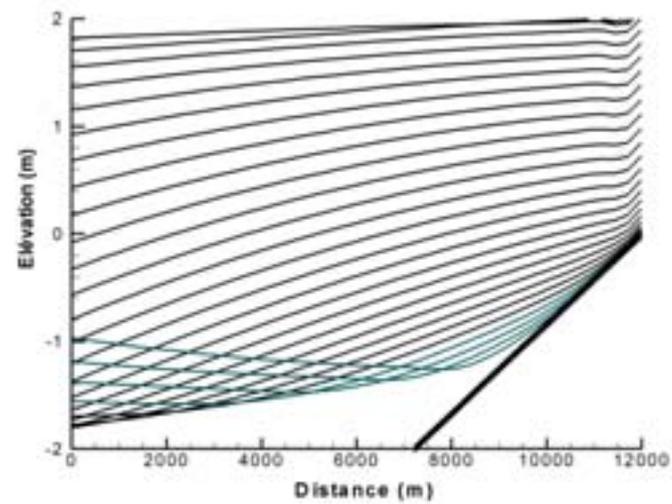


Figure 3.3 : *Test de "wetting and drying" sur une plage plane réalisé par notre code. Etats des surfaces libres : en haut, pendant la marée descendante ; en bas, pendant la marée montante.*

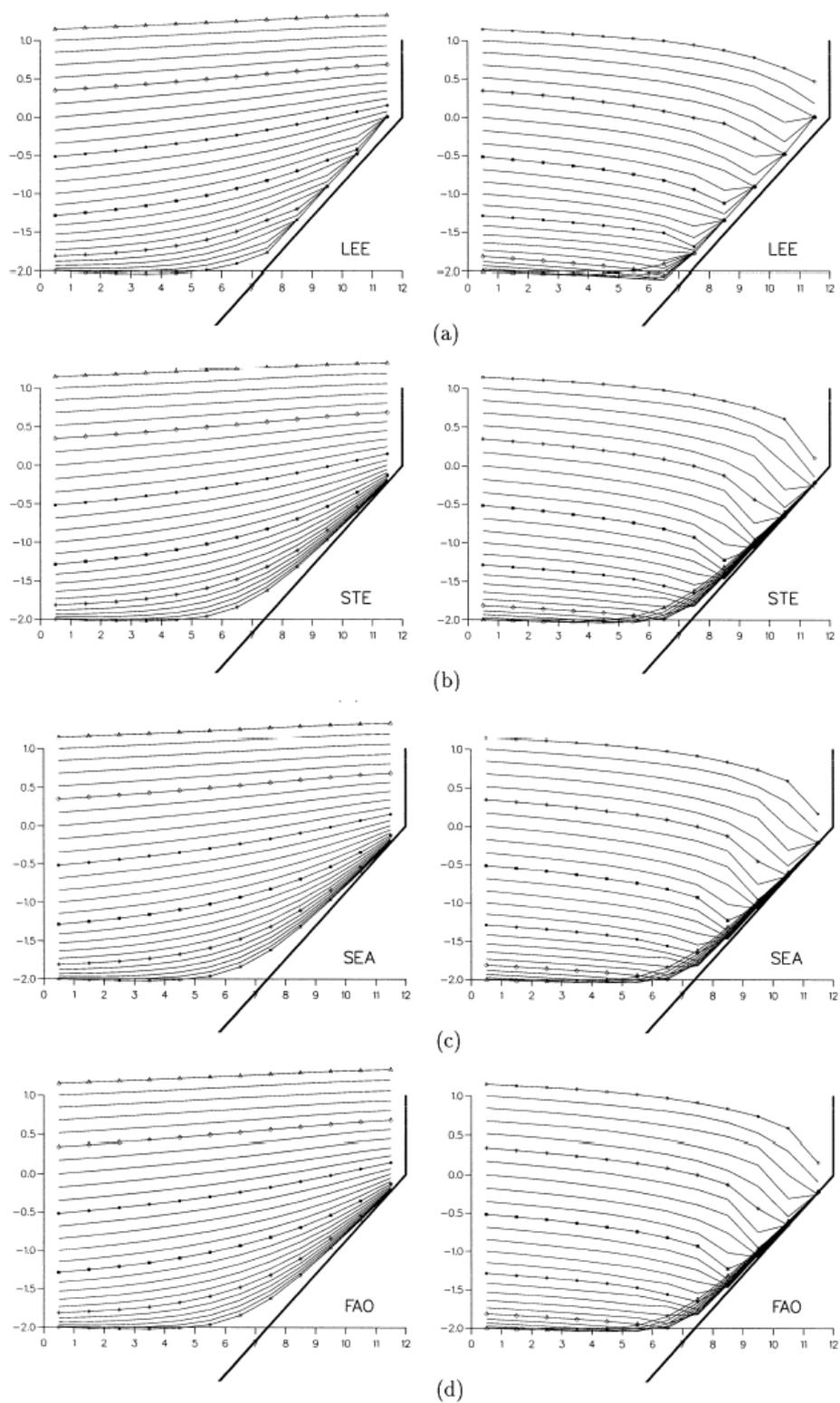


Figure 3.4 : Tests de "wetting and drying" sur une plage plane issus de [Balzano 98].
 Etats des surfaces libres : à gauche, pendant la marée descendante ; à droite, pendant la
 marée montante.

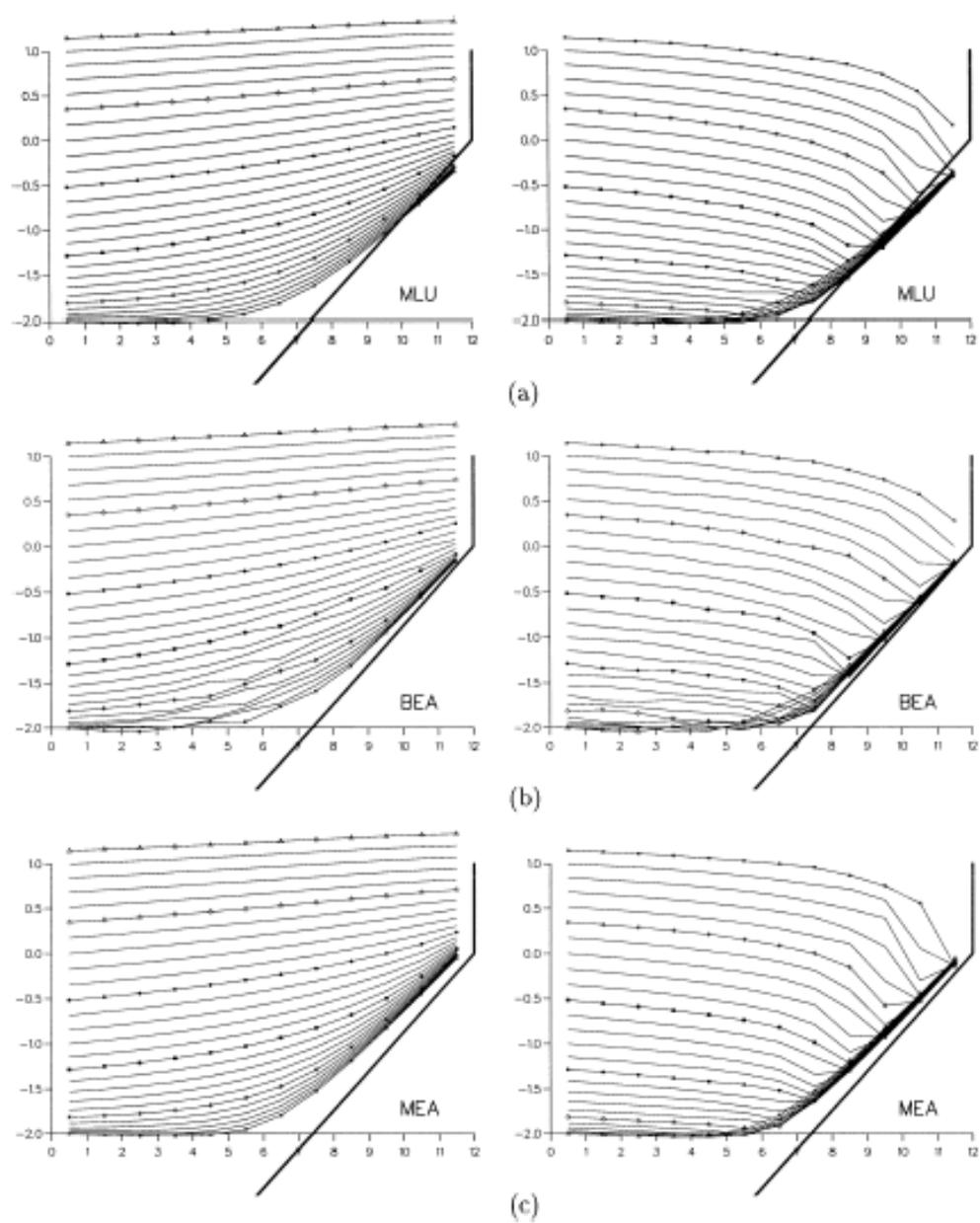


Figure 3.5 : Tests de "wetting and drying" sur une plage plane issus de [Balzano 98].
Etats des surfaces libres : à gauche, pendant la marée descendante ; à droite, pendant la marée montante.

La comparaison de nos résultats (Fig. 3.3) avec ceux issus des simulations menées par Balzano (3.4, 3.5) basées sur les méthodes **LEE**, **STE**, **SEA**, **FAO**, **MLU**, **BEA**, **MEA**.

On observe une bonne gestion des WAD : la ligne d'eau recolle parfaitement à la bathymétrie pendant le jusant et se décolle régulièrement de la bathymétrie lors du flot qui immerge le fond. On ne rencontre pas de hauteurs négatives ni d'espace important entre la surface libre en basse mer et la topographie.

Cependant, à la limite ouest, notre surface libre ne se comporte pas de la même façon que dans les simulations de Balzano. Cela est dû aux conditions limites de notre modèle, pas satisfaisante pour ce cas test. Dans le temps imparti à la thèse, nous n'avons pas réussi à corriger ce problème de condition limite, dans la mesure où il ne prête pas à conséquence dans le cas du bassin d'Arcachon.

Il faudra pourtant y revenir si l'on veut pouvoir simuler des centaines de marées consécutives dans le bassin.

3.2.2 Bassin avec réservoir

Les inadéquations des méthodes numériques développées pour la gestion des zones intertidales peuvent être révélées par un cas test simple, 1D, proposé par Balzano : on soumet une bathymétrie complexe, avec un réservoir rompant un plan incliné, à un battement sinusoïdal de période de l'ordre de la marée.

On teste ainsi la capacité de modèle à gérer à la fois des bathymétries irrégulières et le processus d'émergence/immersion, cela par des grands pas de temps. Toujours proposé par Balzano, ce cas test va nous permettre également de confronter les résultats de notre méthode à ceux des schémas que compare Balzano.

Un bassin est initialement rempli d'eau et la cote de la surface libre est de $2m$ (cf Fig. 3.6). Il est vidé sous l'effet d'un battement sinusoïdal du niveau d'eau, imposé à la limite ouest (amont) du bassin. Lors de la vidange, la surface libre atteint une cote inférieure au maximum relatif du réservoir : on s'attend tout simplement à ce que de l'eau reste piégée dans le réservoir tandis que le reste du domaine se vide et que les plans inclinés s'assèchent, mais les méthodes testées par Balzano traitent mal cette situation. La figure 3.7 est tirée de l'article de Balzano comparant ces méthodes et elle montre bien leurs déficiences quant au traitement de l'émergence la zone intertidale en présence d'un réservoir.

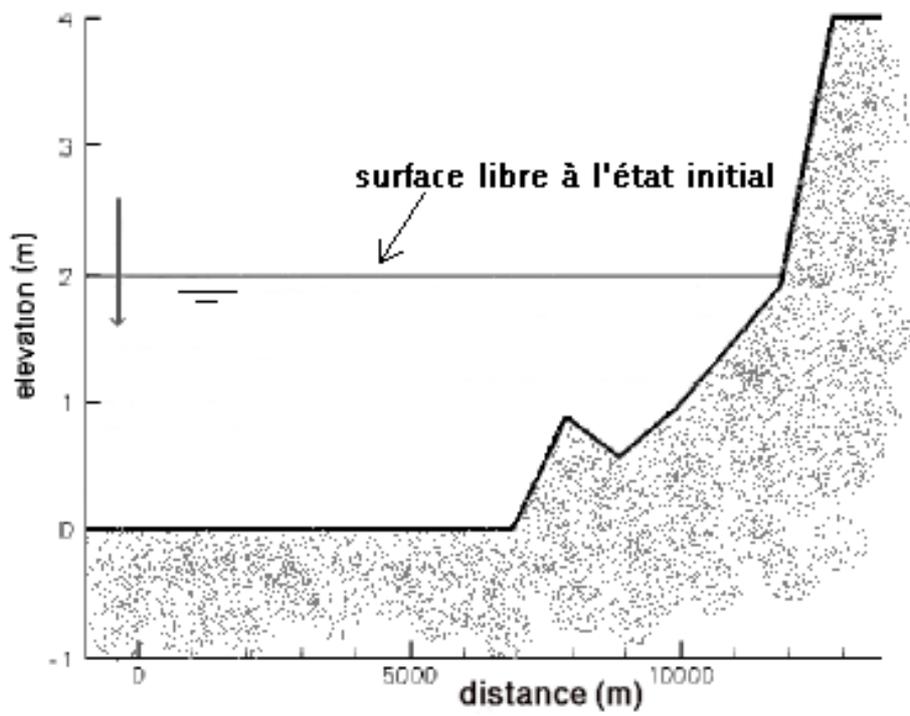


Figure 3.6 : *Bassin avec réservoir : état initial*

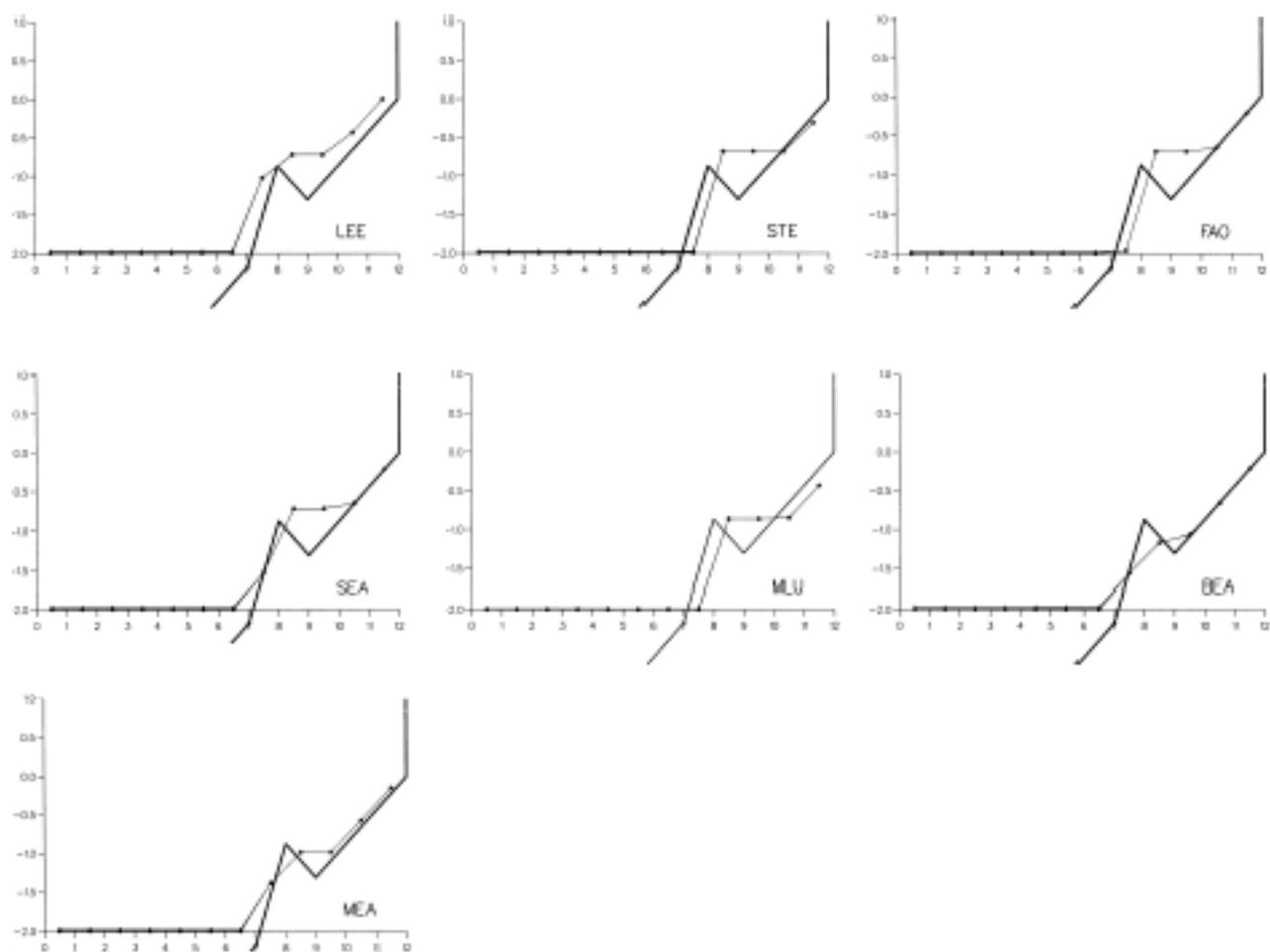


Figure 3.7 : *Etats de la surface libre après simulation de la vidange du bassin - sept traitements numériques des zones sèches pour schémas ADI testés par Balzano [Balzano 98].*

Le domaine modélisé est long de $13800m$ et les paramètres de la simulations sont les mêmes que ceux choisis par Balzano: un maillage lâche de 12 noeuds et un grand pas de temps de $300s$. L'état final de la surface libre, après vidange du bassin, est présenté figure 3.9.

Plusieurs conclusions sont à tirer de ce cas test. Tout d'abord, le grand pas de temps est bien accepté/toléré par le modèle. Il en est de même pour la topographie irrégulière et anguleuse. Surtout, le calcul ne génère aucune aberration physique telle que des hauteurs d'eau négative, la surface libre intersectant la bathymétrie, contrairement aux résultats issus des schémas ADI testés par Balzano.

Ainsi, sur cet exemple qui réunit les trois points difficultés que l'on cherche à résoudre simultanément, on voit que le modèle satisfait aux exigences.

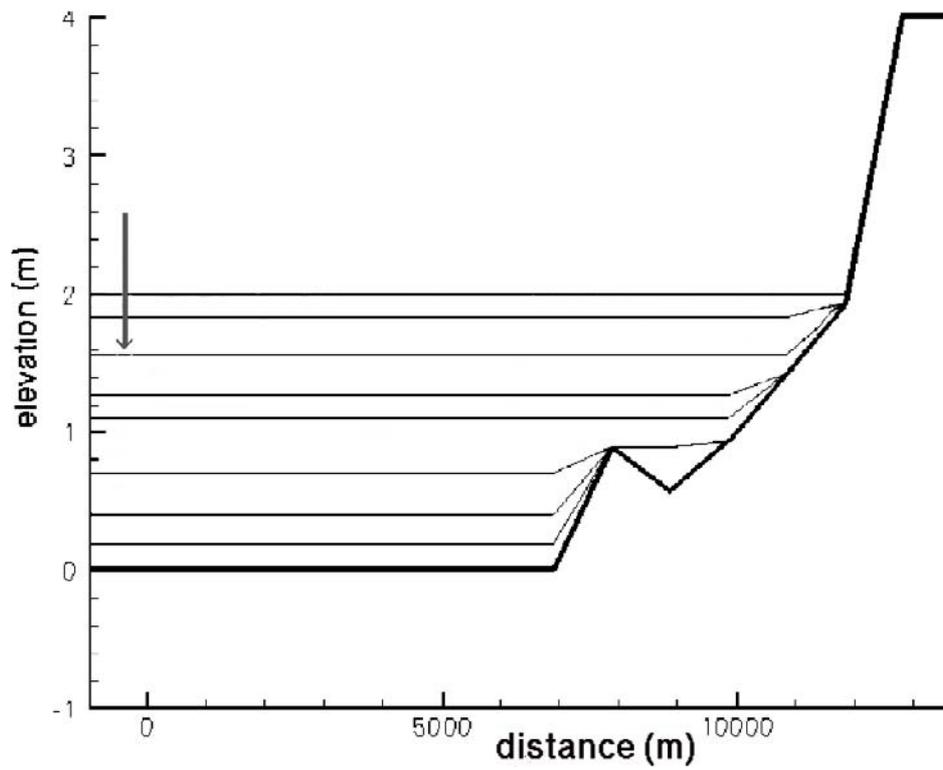


Figure 3.8 : Surface libre à différents stades de la vidange du bassin

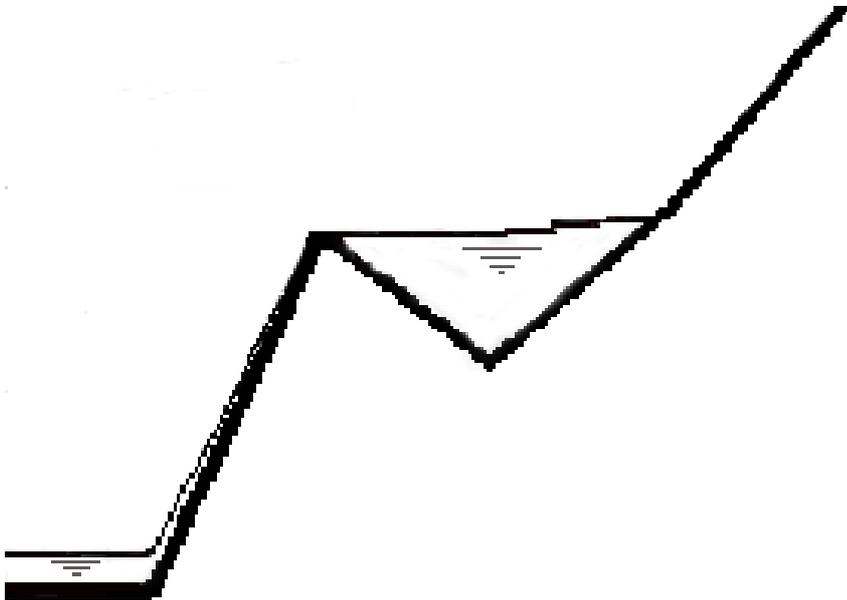


Figure 3.9 : Zoom sur le réservoir après vidange.

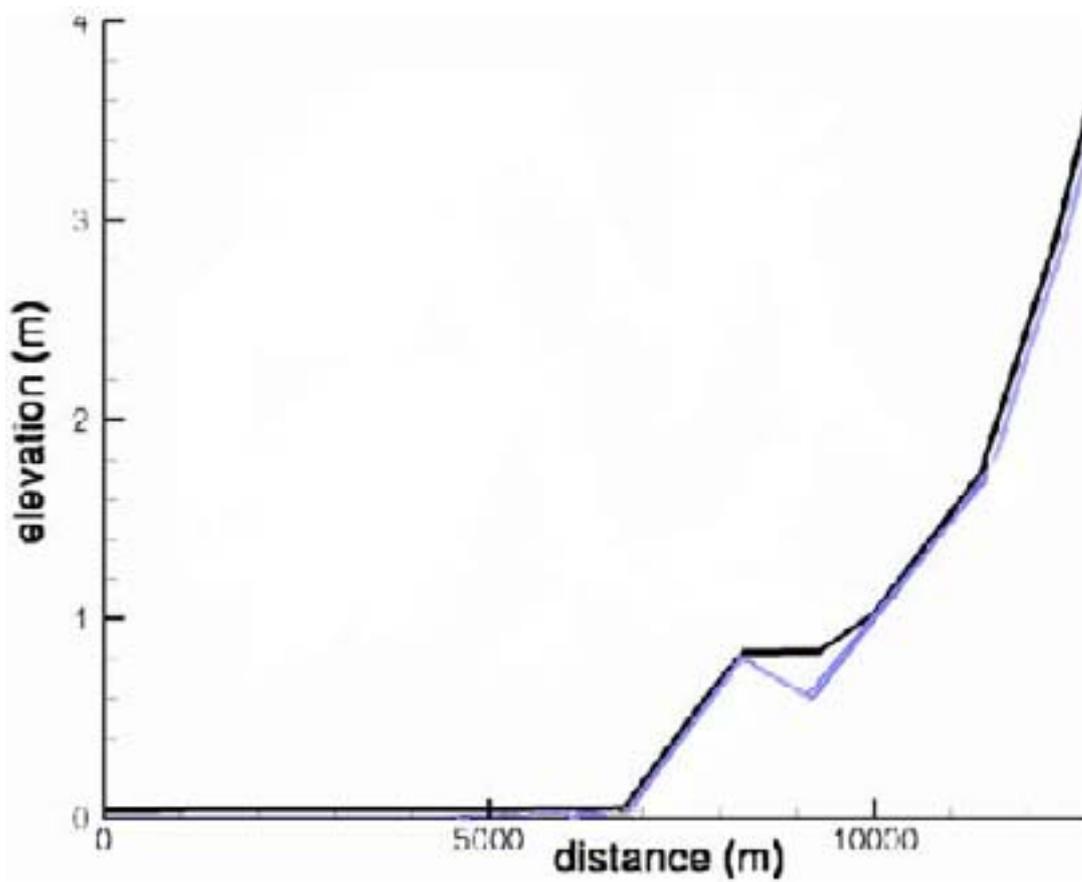


Figure 3.10 : *Comparaison entre notre modèle (trait plein) et un des schémas ADI (tirets) testé par Balzano: état de la surface libre après vidange. Bathymétrie en trait gris*

3.3 Ressaut hydraulique

Pour tester la capacité du code à reproduire des écoulements complexes comme le ressaut hydraulique, pour lequel le fluide passe d'un régime subcritique à un régime supercritique, on considère le cas proposé par Tseng [Tseng 04] : il consiste en un canal de section rectangulaire de $100m$ de long and $10m$ de large. La pente du fond est donnée par MacDonald, 1996 [MacDonald 96], et est représentée sur la figure 3.11.

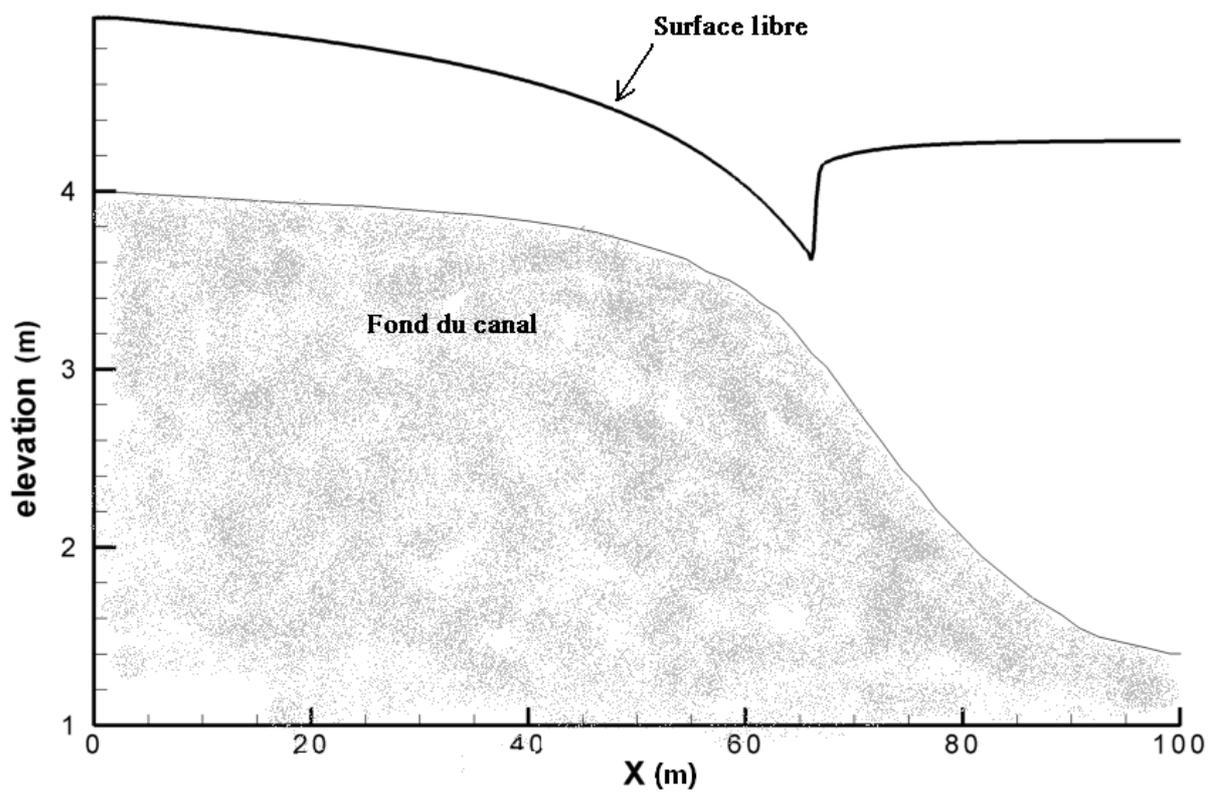


Figure 3.11 : Génération d'un ressaut sur une bathymétrie proposée par MacDonald [MacDonald 96] et testée par Tseng [Tseng 04]

On impose un débit constant de $20m^3/s$ en entrée, et, en aval, la valeur de la cote de la surface libre est fixée à $2.879m$. Enfin, un coefficient de frottement de type Strickler est considéré, égal à 33 tout comme dans les simulations menées par Tseng [Tseng 04].

$$S_0(x) = \left(1 - \frac{4}{gh(x)^3}\right)\hat{h}(x) + \frac{9}{2500h(x)^2}\left(\frac{1}{5} + \frac{1}{h(x)}\right)^{4/3} \quad (3.1)$$

où :

$$\begin{cases} h(x) = \left(\frac{4}{g}\right)^{1/3}\left(\frac{4}{3} - \frac{x}{100}\right) - \frac{9x}{1000}x_a & si \ x < \frac{200}{3} \\ h(x) = \left(\frac{4}{g}\right)^{1/3}(0,674202x_a^4 + 0,674202x_a^3 - 21,7112x_a^2 + 14,492x_a + 1,4305) & si \ x > \frac{200}{3} \end{cases}$$

et :

$$\begin{aligned} \hat{h}(x) &= -1/100\left(\frac{4}{g}\right)^{1/3} - 9/500\left(\frac{x}{100} - \frac{1}{3}\right) & si \ x < \frac{200}{3} \\ \hat{h}(x) &= \left(\frac{4}{g}\right)^{1/3}(0,02696808x_a^3 + 0,02022606x_a^2 - 0,434224x_a + 0,14492) & si \ x > \frac{200}{3} \end{aligned}$$

Sous ces conditions, l'écoulement, subcritique en amont, devient supercritique dans la région centrale du canal et l'on observe un ressaut hydraulique aux environs du milieu du canal.

Pour la simulation numérique, le maillage utilisé est de 100 mailles et le pas de temps est de $0.01s$, pour reprendre les paramètres numériques de Tseng. Les résultats issus de la simulation sont comparés aux solutions analytiques sur les figures 3.12 et 3.13. Comme on peut le voir, l'accord est remarquable : la position du ressaut est capturée précisément et sans oscillation numérique. Sur cet exemple, sans WAD, on peut comparer notre résolution des équations de Saint-Venant sur maillage cartésien en volumes finis avec la technique

de résolution proposée par Nguyen [Nguyen 06], éprouvée sur bathymétrie irrégulière en présence d'un ressaut. Les résultats obtenus par cette méthode de projection de Chorin qui fait référence, robuste et évitant les oscillations en présence d'un ressaut, viennent conforter le bon comportement de notre modèle dans des situation semblables.

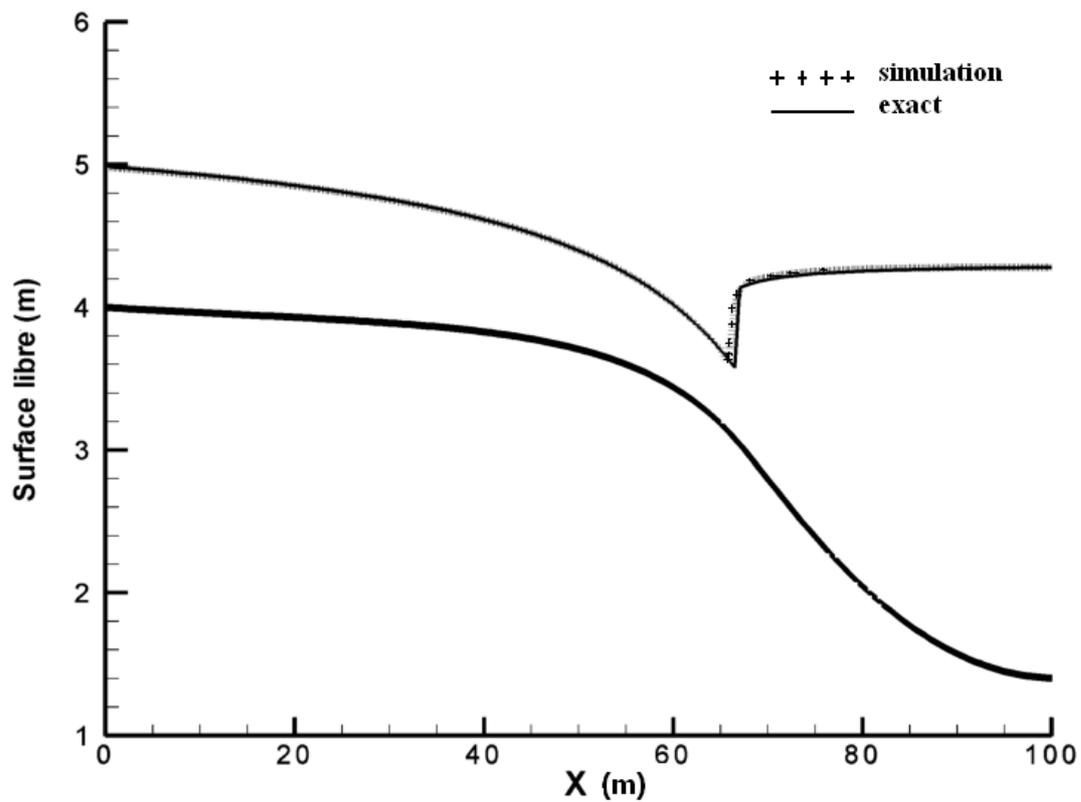


Figure 3.12 : *Surface libre* : comparaison entre le résultat de la simulation (tirets) et la solution analytique (trait plein) donnée par MacDonald [MacDonald 96]

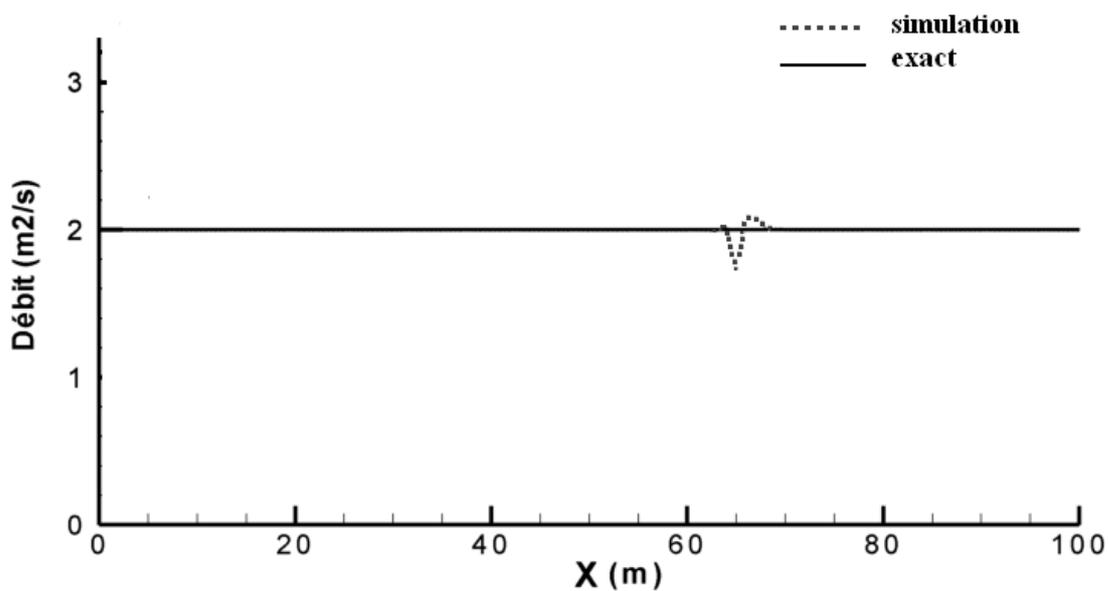


Figure 3.13 : *Débit* : comparaison entre le résultat de la simulation (tirets) et la solution analytique (trait plein) donnée par MacDonald [MacDonald 96]

3.3.1 Parabole de révolution

Plus complexe, on considère maintenant un bassin en forme de parabole de révolution, sans frottement, dont la surface libre oscille librement et infiniment autour d'une position d'équilibre. Ce cas test, tridimensionnel et sans terme de frottement, est, de fait, difficile à reproduire numériquement. La solution analytique est connue, donnée par Thacker [Thacker 81]. La figure 3.15 représente l'état initial de la simulation.

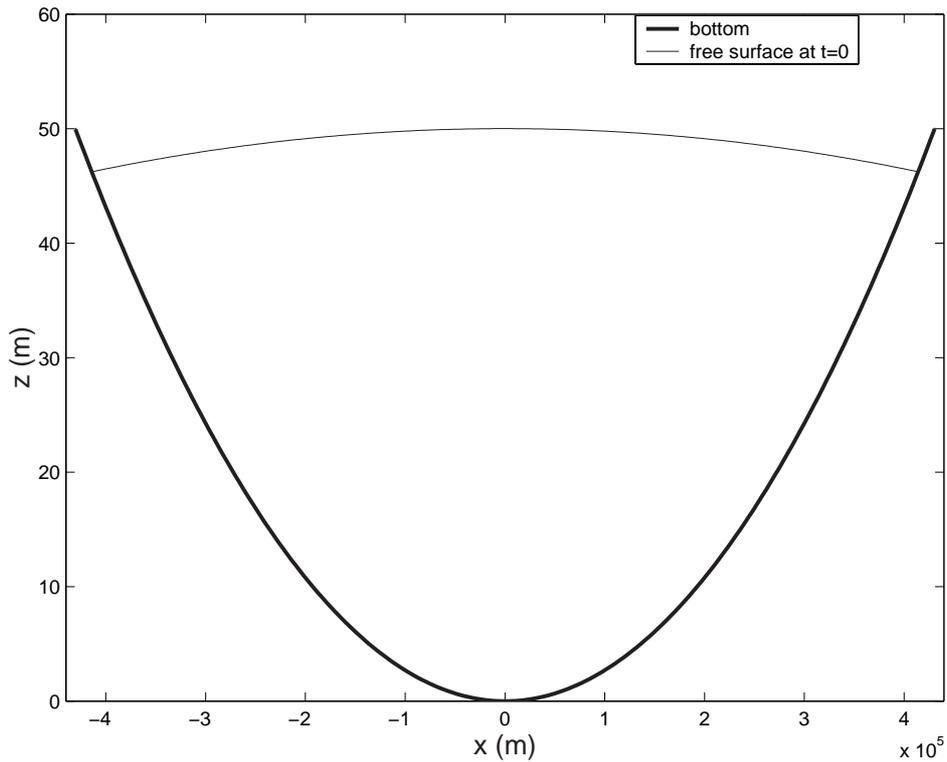


Figure 3.14 : *Position initiale de la surface libre avant oscillations dans un bassin parabolique - section diamétrale.*

La position d'équilibre de la surface libre est définie par l'expression suivante: $x^2 + y^2 = L^2$. x et y sont les coordonnées cartésiennes, les axes du repère sont portés par le rayon (L) de la section horizontale du niveau d'équilibre, et par l'axe de symétrie vertical. La hauteur d'eau sous la surface libre à l'équilibre est donnée par:

$$D = D_0 \left(1 - \frac{x^2 + y^2}{L^2}\right) \quad (3.2)$$

où $D_0 = 50m$. La déformation de la surface libre η est définie par:

$$\eta = D_0 \left(\frac{\sqrt{1-A}}{\text{Acos}(\omega t)} - 1 - \frac{x^2 + y^2}{L^2} \left(\frac{1-A^2}{(1-\text{Acos}(\omega t))^2} - 1 \right) \right) \quad (3.3)$$

où

$$\omega^2 = \frac{8gD_0}{L^2} \quad (3.4)$$

$$A = \frac{(D_0 + \eta_0)^2 - D_0^2}{(D_0 + \eta_0)^2 + D_0^2} \quad (3.5)$$

η_0 étant la déformation de la surface libre à $x = y = t = 0$.

On fixe les paramètres de sorte que la période des oscillations soit égale à $12h$. Ainsi, $L = 430,620$ km et $\eta_0 = 2$ m. Une grille de 200×200 mailles est choisie pour les simulations numériques, et le pas de temps est de $\Delta t = 100s$. La figure 3.16 montre les résultats obtenus: il apparaît clairement que le processus d'émergence/immersion des bords est géré précisément par le modèle. Enfin, les ondulations en surface, artéfacts numériques, observées avec d'autres méthodes [Balzano 98], n'apparaissent pas ici.

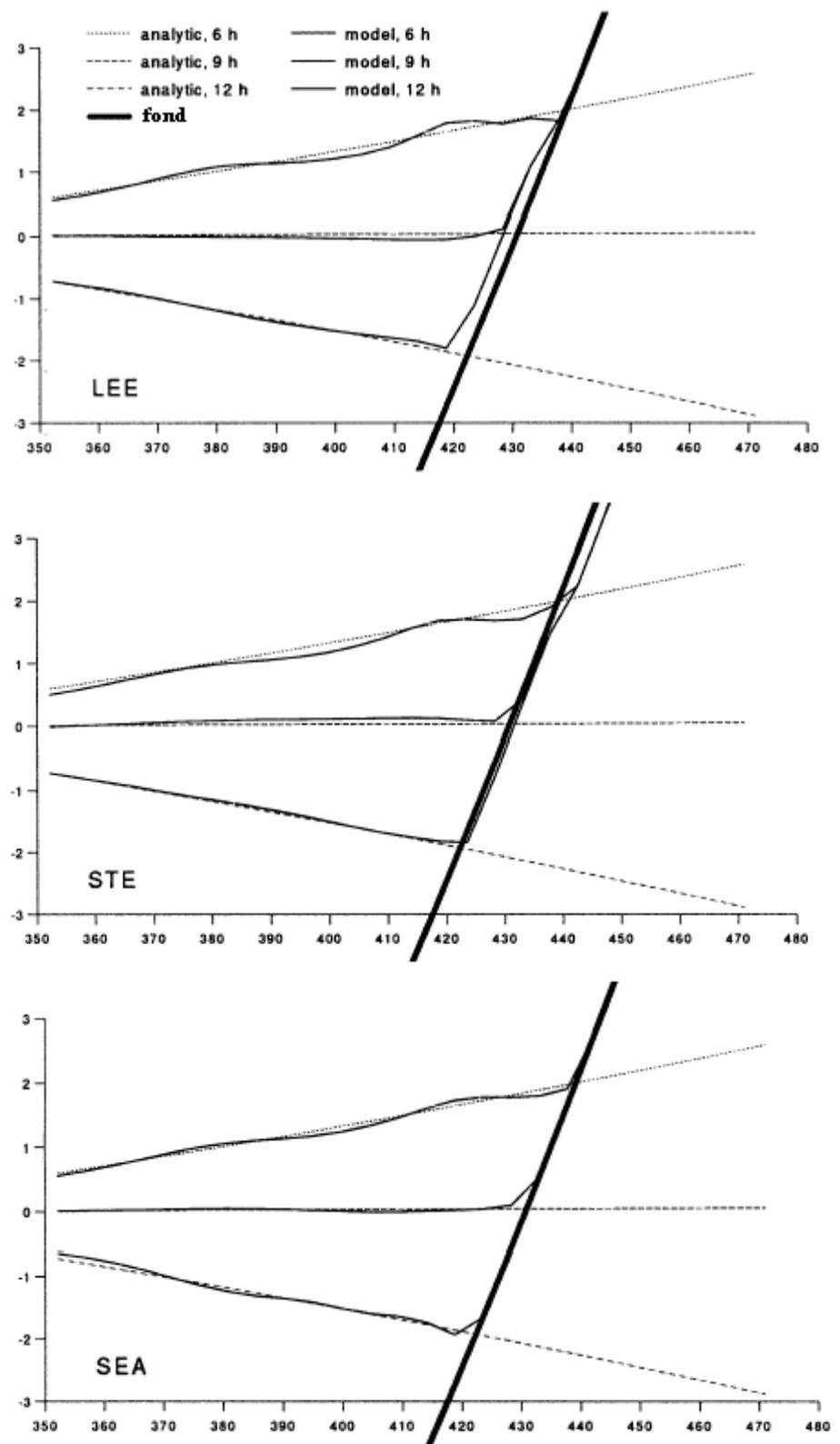


Figure 3.15 : *Position initiale de la surface libre avant oscillations dans un bassin paraboïde - section diamétrale.*

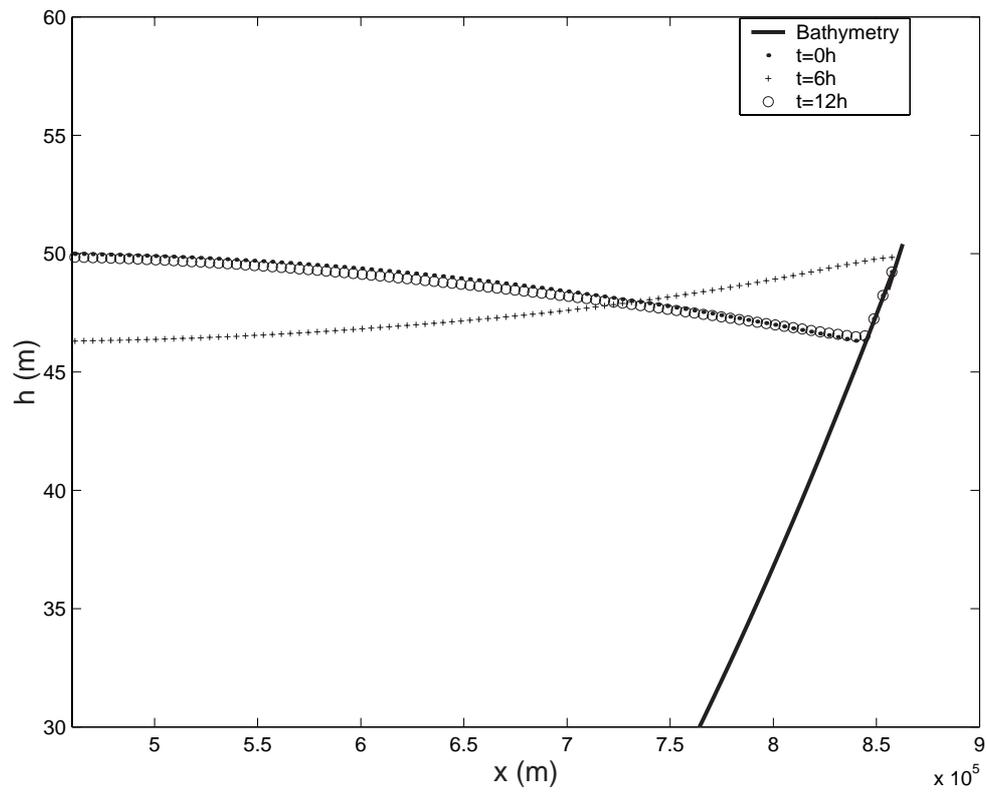


Figure 3.16 : Simulation de l'évolution de la surface libre oscillant librement dans un réservoir parabolöide sans frottement : surface libre à différents instants

3.4 Bore sur plage inclinée

La remontée d'un bore* (mascaret) le long d'une plage plane inclinée est un cas test intéressant puisqu'il permet d'illustrer la capacité du modèle à simuler des ondes plus courtes se propageant sur les plages ou estrans. Nous nous inspirons des expérimentations menées par Yeh et al. (Yeh and Ghazali 1988, Yeh et al. 1989). L'onde est générée par l'initialisation d'une rupture de barrage sur fond mouillé et se propage dans un chenal dont les dimensions sont : $9m$ de long et $1,2m$ de large. La pente de la plage est de $7,5^\circ$. La hauteur d'eau initiale en amont (offshore), au-dessus du fond plat (horizontal en amont), est de $h_0 = 9,75cm$ tandis que la couche d'eau derrière le barrage est de $h_1 = 2,31h_0$. Le nombre de Froude relatif à l'onde à l'instant initial, offshore, est de $Fr = 1,43$, et représente la force initiale du front d'eau. Pour les besoins de notre simulation numérique, Le domaine est couvert par un maillage de 500 mailles en longueur par 4 mailles en largeur et le pas de temps pour la simulation est de $0,001s$.

3.4.1 Propagation du bore

Dans un premier temps, il s'agit de simuler la formation du front et sa propagation, avant le processus de "run-up", c'est-à-dire avant que l'onde n'atteigne le plan incliné. Les résultats numériques du profil de l'onde, lorsque celle-ci est totalement développée, sont comparés aux valeurs expérimentales mesurées par Yeh et al. (1989).

A cet instant, Le pied de l'onde issue de la modélisation numérique est situé à $9cm$ du rivage (ou shoreline). Les expériences de Yeh montrent l'apparition de turbulence tout au long du front, ce qui rend la position de l'interface difficile à définir précisément. Deux profils issus de l'expérience, respectivement la limite supérieure et la limite inférieure de la région turbulente, sont représentés sur la figure 3.17.

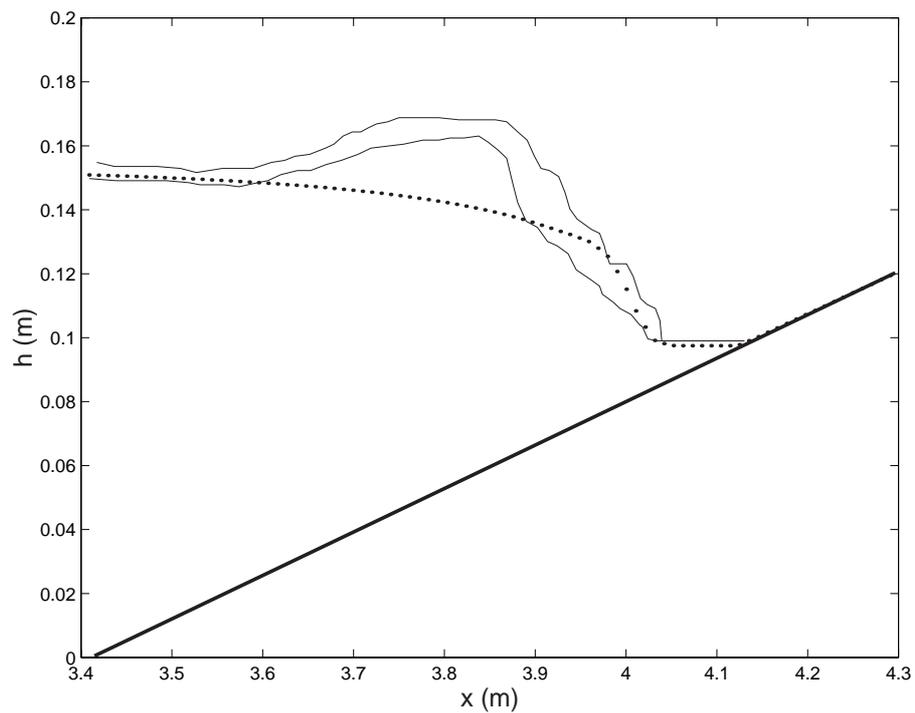


Figure 3.17 : *Comparaison entre les résultats numériques et les mesures expérimentales du profil d'un bore au large de la plage. Les traits pleins correspondent aux limites supérieure et inférieure du bore turbulent expérimental (Yeh). Les tirets représentent notre résultat numérique. Le pied du front d'onde se situe à 9cm du rivage.*

On observe une forme non uniforme de l'élévation du front: mise en évidence et non expliquée par Yeh et al, une proéminence se forme en tête du front, que ne parvient pas à prédire la théorie des écoulements en eaux peu profondes. Surtout, notre modèle ne prend pas en compte la turbulence. Les informations tirées de la comparaison entre les résultats numériques et expérimentaux doivent donc être considérées avec prudence et circonspection. Cependant, comme le montre la figure 3.17, on obtient un accord correct entre calculs et mesures, en particulier concernant l'amplitude et le profil.

3.4.2 Bore run-up

Le processus complet (propagation du front, montée le long de la plage, et redescente) a été simulé numériquement par Hibbert and Peregrine [Hibbert 79] et Vincent et al. [Vincent 01]. Globalement, le comportement obtenu par modélisation est en bon accord avec les prédictions analytiques (Shen and Meyer, 1963), tous basés sur la même théorie des écoulements en eaux peu profondes. La figure [?] présente les résultats obtenus sous les conditions similaires à Yeh, énoncées précédemment. Les différentes courbes représentent les différents instants de la simulation: $0,7s$, $0,9s$, $1,1s$, $1,3s$, $1,5s$, $2s$, $2,8s$, $3,2s$, $3,5s$ et $4s$ après la génération de l'onde par rupture de barrage.

Nos résultats sont très proches de ceux d'Hibbert and Peregrine [Hibbert 79] et Vincent et al. [Vincent 01]. Dans la première phase de montée de la vague le long de la plage, l'amplitude du bore décroît progressivement. Un léger renflement persiste au niveau du front de l'écoulement, ce qui atteste de la précision du modèle : il réussit en effet à advecter l'interface eau/plage sans diffusion numérique excessive comme observé par Hibbert and Peregrine [Hibbert 79]. Au temps $t = 2,8s$, la surface libre atteint sa cote maximum : cet instant correspond au point d'équilibre entre la gravité et l'inertie. Ensuite s'amorce la descente, caractérisée par l'apparition d'un bore de back-wash (à $t = 4s$), causé par le lent seaward de l'eau.

De même que pour les simulations de Hibbert et Peregrine [Hibbert 79] et Vincent et al. [Vincent 01], une divergence conséquente est à noter entre les résultats numériques et les mesures de Yeh et al. (1989) ou Miller (1968). Les observations expérimentales ont mis en évidence la dégénérescence du bore unique en deux masses d'eau successives, la première intégrant la turbulence au mouvement de montée. Or cette dynamique turbulente

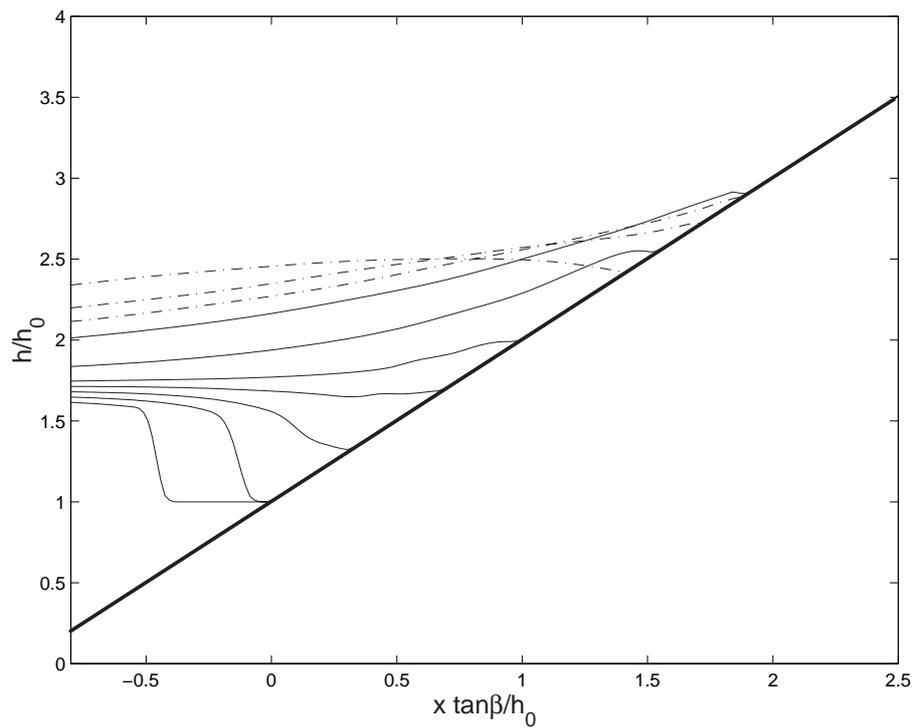


Figure 3.18 : *Simulation numérique d'un bore sur une plage plane inclinée. les traits pleins représentent la montée ($t=0, 7s, 0, 9s, 1, 1s, 1, 3s, 1, 5s, 2s$ et $2, 8s$) et les tirets représentent la descente ($t=3, 2s, 3, 5s$ et $4s$).*

ne peut être correctement décrite par la théorie des écoulements peu profonds.

3.5 Couche de mélange turbulente

Outre la bonne gestion numérique du terme source topographique et des zones intertidales, la simulation des écoulements géophysiques en eaux peu profondes doit pouvoir prendre en compte des phénomènes physiques comme la diffusion turbulente et de frottement sur le fond. Un cas test tel qu'une couche de mélange en milieu peu profond va permettre de valider l'implémentation dans notre modèle de termes de diffusion turbulente horizontale et de friction sur le fond.

Les études expérimentales de Chu and Babarutsi(1988) et numériques de Hinterberger et al. (2003) [Hinterberger 03] guident notre choix de modélisation: on considère le même canal de $l = 0,61m$ de large et $L = 2,96m$ de long, dans lequel s'écoule un film d'eau de $2,96cm$ d'épaisseur. Deux vitesses $U = 26,4cm/s$ and $u = 11,1cm/s$ sont imposées en entrée, juxtaposées en amont de l'écoulement (cf Fig.3.19).

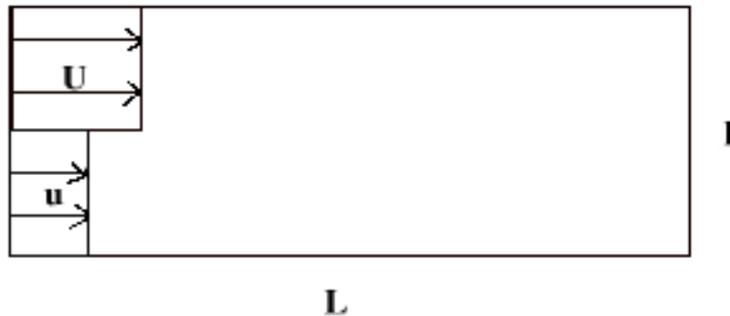


Figure 3.19 : *Simulation numérique d'une couche de mélange : conditions initiales.*

En vue d'une comparaison de nos résultats avec ceux d'Hinterberger et al. issus d'une Depth Averaged Large Eddy Viscosity Simulation (DA-LES), on choisit le même coefficient de friction Cf , fonction du nombre de Reynolds ($Re = \rho Ul/\mu$). Ce coefficient s'obtient en résolvant l'expression explicite suivante:

$$Cf = 0.0385.Re^{-1.3} + 6.10^{-4} \quad \text{lorsque} \quad 2000 < Re < 10^7 \quad (3.6)$$

$$Cf = 0.00454 \quad \text{lorsque} \quad 10^7 < Re \quad (3.7)$$

Le coefficient de diffusion horizontale ν peut se décomposer comme suit: $\nu = \nu_0 + \nu_t$, où ν_0 est la viscosité cinématique moléculaire et ν_t le coefficient de viscosité turbulente related to depth averaging. D'après Fischer (1973) [?], le coefficient ν_t peut être calculé

selon la formule: $\nu_t = ChU$. Dans notre modèle, la constante C est fixée à $C = 0,0016$, le maillage est cartésien et les dimensions de la maille sont de $\Delta x = h$ et $\Delta y = 0,1h$, soient 20000 mailles qui couvrent le domaine de calcul.

Une fois que l'écoulement a atteint son régime stationnaire, le champ de la vitesse selon x est établi. L'écoulement, alors stationnaire, montre une couche de mélange qui s'élargit progressivement de l'amont vers l'aval du canal. Les figures 3.20 présentent les profils de la vitesse longitudinale en trois sections transverses du canal, situées respectivement à $x = 25h$, $x = 50h$, $x = 100h$.

La comparaison de nos résultats avec ceux obtenus par le modèle DA-LES d'Hinterberger et al. [Hinterberger 03] atteste d'une grande correspondance, aussi bien entre les champs de vitesse longitudinale qu'entre les taux de diffusion.

Cependant, les instabilités de type Kelvin-Helmoltz observées expérimentalement et simulées par le modèle 3D-LES d'Hinterberger n'apparaissent pas lors de nos simulations. Hinterberger et al. (2003) explique ce manque par le fait que le système 2DH des équations de Saint-Venant ne permet pas de reproduire la cascade inverse de l'énergie et donc la formation des grosses structures turbulentes. Cela a pour conséquence évidente de sous-estimer le taux de diffusion turbulente au sein de la couche turbulente. Afin de tenir compte de l'écoulement tri-dimensionnel turbulent que le modèle (bidimensionnel) ne résout pas, un terme source serait à ajouter aux équations de notre système 2DH. Pour des développements ultérieurs, les travaux plus convaincants encore proposés récemment par [Hinterberger 03, Uijtewaal 03] peuvent être considérés et offrir des cas-tests afin de valider les implémentations pour la modélisation de la turbulence.

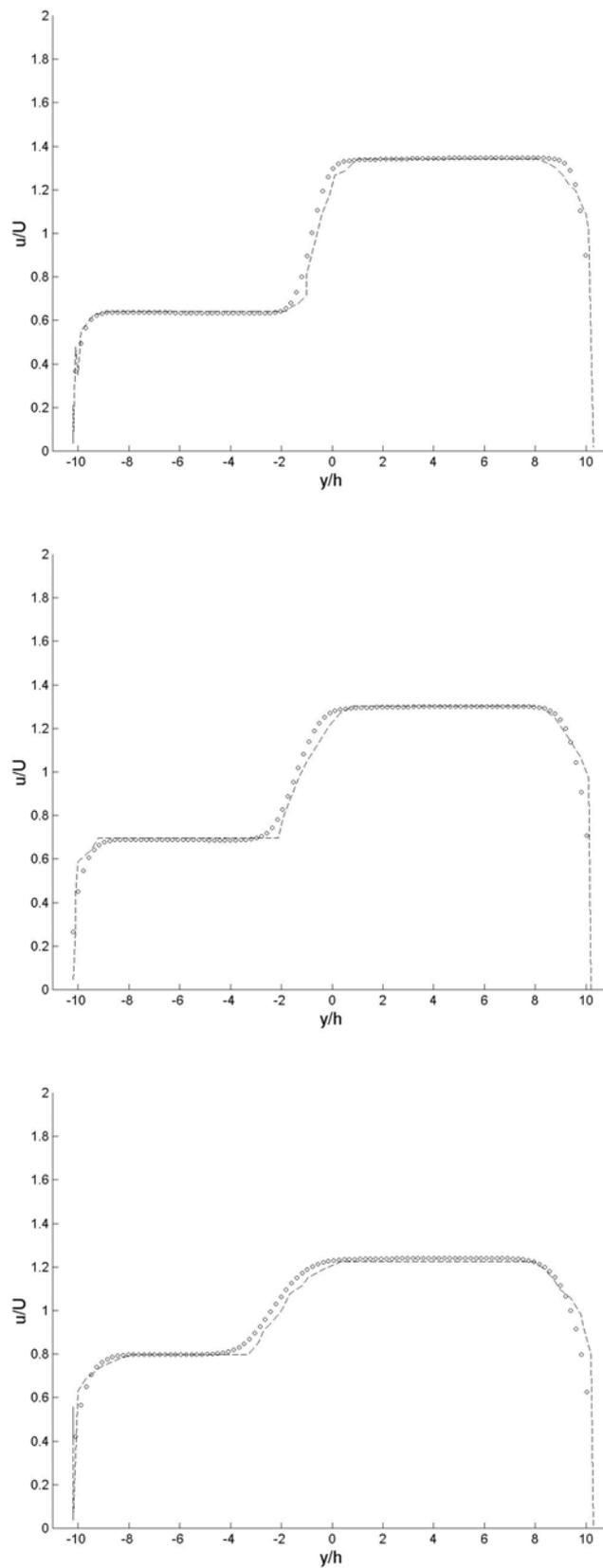


Figure 3.20 : Profils de la vitesse longitudinale pour des coupes transversales situées à $x = : 25h, 50h, 100h$. En trait plein, nos simulations, en pointillés les résultats de Hinterberger (DA-LES).

3.6 Conclusion du chapitre

Cette phase de validation, volontairement orientée en vue d'une application du code aux écoulements tidaux dans une lagune à bathymétrie complexe et irrégulière, montre un bon comportement général du modèle. Elle montre cependant aussi des manques (conditions limites) et doit être poursuivie. Il paraît intéressant, par exemple, de tester différents schémas numériques, d'étudier l'influence du maillage sur la hauteur-seuil à fixer pour le traitement des WAD...

Compte tenu du temps imparti, nous avons estimé que les propriétés essentielles à la simulation du site réel avaient été validées. Conscients des imperfections, nous avons abordé la simulation des écoulements dans le bassin d'Arcachon sans chercher à perfectionner plus avant les développements numériques. Les résultats obtenus lors de la modélisation du site côtier permettront de relativiser ces manques pour des simulations de situations géophysiques infiniment complexes.

Les améliorations à apporter au code, mises en lumière dans cette partie "validation sur cas tests théoriques", apparaissent comme les perspectives immédiates de ce travail de thèse.

Chapitre 4

Application à l'étude de l'hydrodynamique d'une lagune à bathymétrie complexe : le Bassin d'Arcachon

Protégé des rigueurs de l'océan Atlantique par la flèche sableuse du Cap Ferret, baie très peu profonde largement occupée par les estrans, le bassin d'Arcachon est une lagune tidale qui s'inscrit tout à fait dans le cadre des milieux peu profonds.

Offrant, avec le port d'Arcachon, l'unique abri de la côte Atlantique dans le grand sud de la France (cf 4.1), le Bassin est un lieu rare et recherché pour la pêche, la plaisance, et comme lieu de villégiature. Ses larges estrans ont permis le développement d'une activité de conchyliculture renommée, et accueillent une faune et une flore typiques des régions lagunaires.

Ces multiples intérêts économiques, touristiques et naturalistes, richesses inestimables, sont autant de sources de pression sur cet environnement fragile (surexploitation des espèces, constructions immobilières en front de mer, surpopulation estivale, concentration des déchets, etc.), ce qui explique la volonté affirmée des riverains et acteurs du bassin à agir contre leurs conséquences : l'engraissement de certaines zones (nord du bassin), l'érosion qui en affecte d'autres, la pollution des eaux, etc., contre les évolutions négatives et les dégradations qui menacent le bassin.

Cette préoccupation de la santé actuelle et future de la lagune a initié un nombre considérable d'études, la mise en oeuvre de campagnes d'observations, le développement de modèles physiques (LCHF, 1973) puis numériques (SOGREAH, IFREMER)(cf. § 2.4.4.).

L'attention portée à ce site côtier exceptionnel fédère également des équipes de recherche, régionales et nationales, de toutes disciplines, contribuant à l'avancée dans la connaissance fondamentale de processus physiques, biologiques ou bio-chimiques dont le bassin est le siège.

Dans le cadre de cette thèse universitaire, l'application au bassin d'Arcachon du code de calcul développé pour la simulation de l'hydrodynamique des baies tidales très peu profondes va permettre de valider le modèle sur un cas réel à bathymétrie complexe. La comparaison avec les observations et résultats numériques disponibles dans une base de données archivées très fournie attestera de la robustesse du code mais aussi du bon traitement des zones intertidales et de la juste représentation de l'hydrodynamique et de ses caractéristiques observées *in situ*.

Dans cette partie, nous présentons d'abord le bassin d'Arcachon, sa morphologie complexe et les facteurs dynamiques qui agissent ainsi que les observations *in situ* qui vont guider nos choix de modélisation.

Ensuite nous précisons les paramètres numériques du modèle, et décrivons la démarche retenue pour ajuster l'hydrodynamique simulée de la lagune.

Puis nous interprétons les champs instantanés calculés et les cartographies de grandeurs physiques pertinentes pour illustrer le comportement hydraulique des différentes régions du bassin.

Enfin, nous présentons une rapide mise en situation de bureau d'études d'ingénierie pour laquelle nous utilisons le code comme outil d'aide à la décision d'aménagement visant à résoudre un réel problème de la baie.

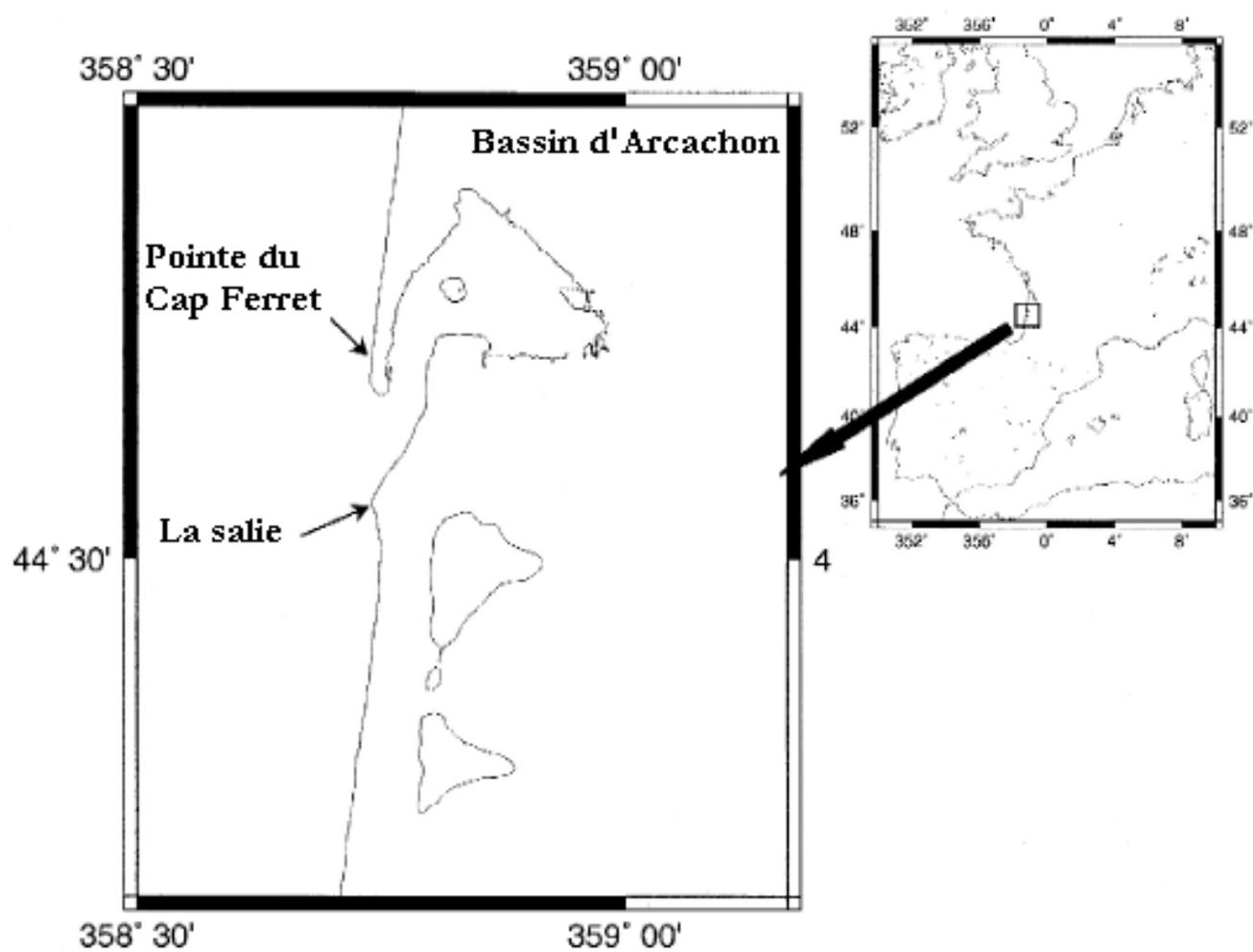


Figure 4.1 : Localisation du Bassin d'Arcachon, côte Atlantique, France.

4.1 Présentation du bassin d’Arcachon

Le Bassin d’Arcachon est une étendue d’eau triangulaire de 160 km² semi-fermée par une flèche sableuse. Situé au sud-ouest de la France (cf 4.1), il est, entre la Pointe de Grave et Bayonne, l’unique interruption de la côte Atlantique sableuse rectiligne. Il se situe dans un milieu mésotidal à macrotidal, c’est-à-dire pour lequel le marnage est compris entre de 2m et 4m.

La presqu’île du Cap Ferret (cf fig. 4.2,(1)), située aux environs de 44°40’ de latitude nord et 1°10’ de longitude ouest, constitue la frontière naturelle entre d’une part le domaine océanique, d’autre part le domaine lagunaire (cf fig. 4.2, (2)) qui s’assimile à un triangle d’une vingtaine de kilomètres de côté [Gassiat 89]. Un système de passes (cf fig. 4.2, (3)) met en communication le bassin et la mer.

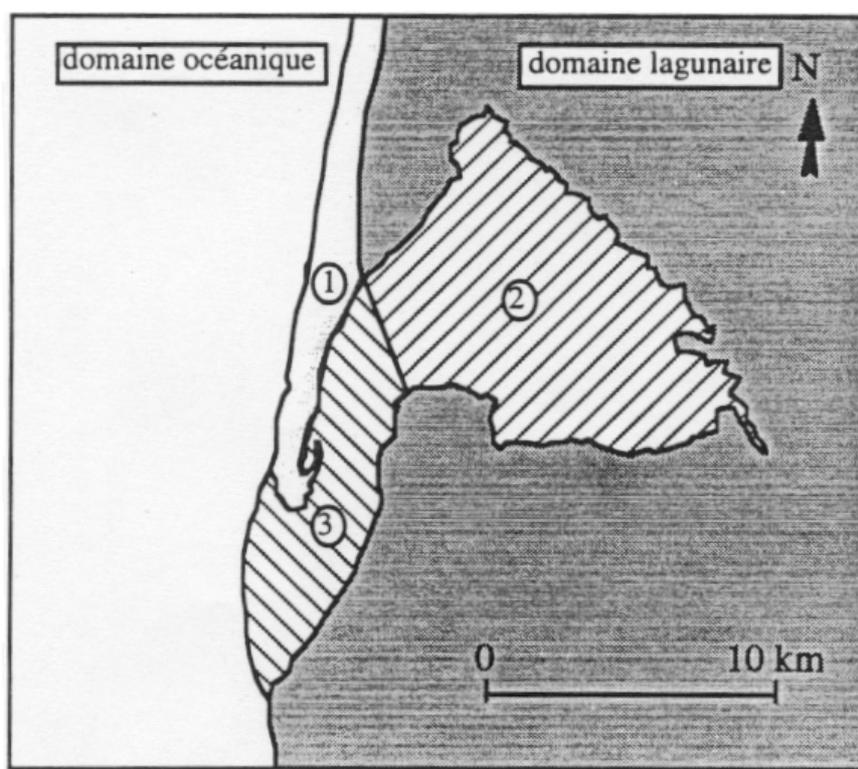


Figure 4.2 : Morphologie du bassin : (1) la presqu’île du Cap Ferret, (2) le domaine lagunaire, (3) la zone des passes. D’après Thauront, 1994 [Thauront 94]

Depuis tout temps observé et étudié (Beautemps-Beaupré en 1862, Caspari en 1872, Bouchet en 1968, etc.), le bassin est l'objet de maints ouvrages dédiés à sa description. Nous nous appuyons sur les écrits récents [Gassiat 89, Thauront 94, Cayocca 96] qui synthétisent les travaux qui les ont précédés, afin, dans cette première partie, de présenter succinctement l'environnement de la lagune : sa morphologie actuelle, les agents dynamiques responsables de son hydrodynamique et la localisation de leurs zones d'action, enfin la répartition des différents types de sédiments et les grandes tendances sédimentaires.

4.1.1 Un système lagunaire à la morphologie complexe

Le bassin présente les caractéristiques morphologiques des milieux lagunaires puisqu'il comprend les trois unités qui les définissent :

«- une barrière sableuse ;

«- une étendue d'eau ;

«- des passes qui, à travers la barrière, relie la lagune à la mer.

Les descriptions qui suivent, présentant ces trois unités, sont cartographiées sur la figure 4.5.

a - Le domaine lagunaire

Le domaine lagunaire s'étend sur 160 km² et se divise en trois sous-unités morphologiques.

Le platier intertidal regroupe le "schorre" d'une part, immergé uniquement en période de haute mer de grande vive eau (partie amont du bassin et Île aux Oiseaux), et la "slikke" d'autre part, inondée à chaque marée. Chacune de ces zones est colonisée par une végétation particulière.



Figure 4.3 : Photographie de la région d'Arès : platier recouvert de végétation



Figure 4.4 : Paysage de l'Île aux Oiseaux

Les chenaux occupent 48% de la surface du bassin et se classent en trois groupes (cf fig 4.5) : le groupe nord (chenaux de Lège, de Graveyron, de la Vigne), le groupe sud (chenaux de Canton, Audenge et du Teich) et le groupe central (chenaux de Mobino, Andernos et Mouchtalette). Ces chenaux principaux sont reliés entre eux par des chenaux de liaison transversaux.

Le delta de la Leyre, d'une superficie de 16 km² occupe le sud-est de la lagune, influencé par la marée et la rivière qui s'y épanche.

b - Le cordon dunaire : la flèche du Cap Ferret

Formée sous l'action des courants de dérive littorale qui longent la côte Atlantique du nord vers le sud, la flèche du Cap Ferret s'étire actuellement sur 18 km de long et sur 1 à 5 km de large. Elle résulte de l'accumulation de sables dunaires fins à moyens surmontant des sables marins plus grossiers. Sa partie sud est mobile, oscillant entre accrétion et érosion. D'après Gassiat [Gassiat 89], la flèche connaît aujourd'hui une phase de stabilité relative par rapport aux périodes de forte accrétion ou de recul rapide qu'elle a pu connaître.

c - La zone des passes

Comprise entre l'axe Bélisaire-Le Moulleau et l'isobathe* des -10 m, cette zone se décompose en deux sous-unités (cf fig 4.5).

Les passes externes, subissant simultanément houle et marée, sont édifiées au niveau du delta de jusant. Elles jouxtent les bancs d'Arguin et du Toulinguet qui sont engraisés par les sédiments transitant vers le sud sous l'action de la dérive littorale. La marée y creuse les passes dites nord et sud par lesquelles s'échangent, en vive eau, jusqu'à 370 millions de m³ d'eau entre la lagune et l'océan, contre seulement 130 millions de m³ en morte eau.

Les passes internes, à l'endroit du delta de flot, sont séparées par les bancs de Bernet et du Moulleau.

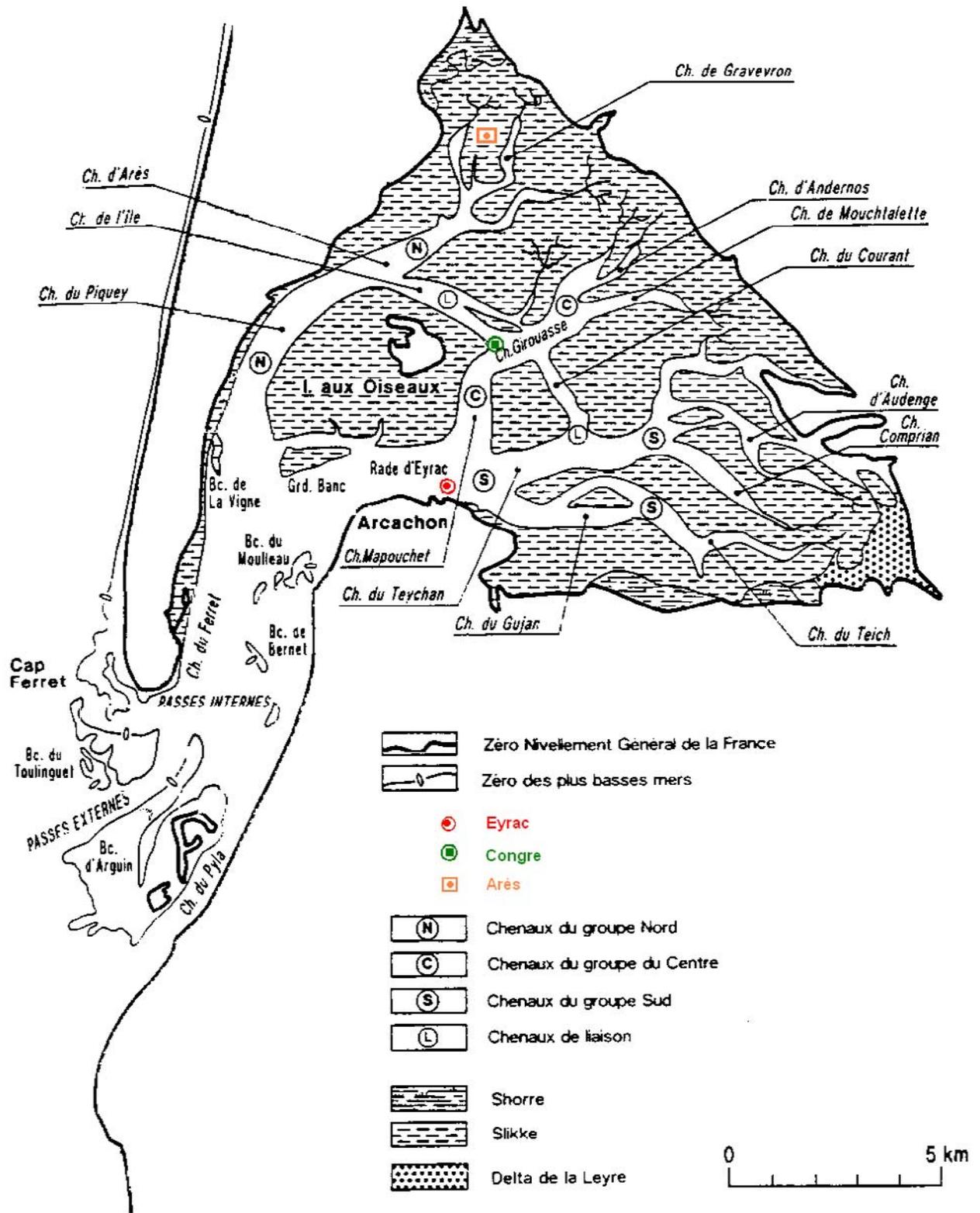


Figure 4.5 : Localisation des lieux géographiques et des particularités morphologiques du bassin d'Arcachon. D'après Thauront, 1994 [Thauront 94]

4.1.2 Les agents dynamiques : observations *in-situ*

Les observations et les mesures relevées au sémaphore du Cap Ferret ainsi qu'en divers points du bassin, conduites notamment par le Laboratoire Central d'Hydraulique de France (1973) [Collectif 73], ont permis de décrire les états saisonniers de l'hydrodynamique de la lagune depuis 50 ans : régime des vents, de la houle, marégrammes en un grand nombre de stations de la lagune. Le traitement de ces données renseigne sur la prédominance locale de tel ou tel agent, et oriente le choix du modèle physique pour la simulation des phénomènes observés tout en indiquant les limites géographiques de sa validité.

a - Les trois domaines hydrodynamiques

Les trois agents principaux qui agissent sur l'hydrodynamique du bassin sont le vent, la houle et la marée. Leur observation a permis d'identifier trois domaines se distinguant par leur fonctionnement hydrodynamique propre.

Le domaine océanique est principalement soumis à la houle et aux vents dominants.

Le domaine intermédiaire ou zone des passes, ressent les effets conjugués de la houle et des courants de marée, le clapot s'ajoutant dans les passes internes.

Le domaine lagunaire, lui, est soumis essentiellement à la marée [Collectif 97].

b - Description des agents moteurs de l'hydrodynamique

Dans chacun des domaines, les manifestations de ces agents dynamiques ont été observées pour caractériser un comportement moyen de la zone, au sens statistique.

«- les vents locaux

Le vent provoque la formation de la houle dans le domaine océanique, la formation du clapot* dans le domaine lagunaire, et agit sur les éléments fins du sable émergé des plages et dunes par un engraissement* ou une érosion des sites. Les traitements, par le Bureau Météorologique Régional de Mérignac, des relevés effectués au sémaphore du Cap Ferret entre 1951 et 1980 traduisent bien le régime général de la lagune [Gassiat 89] : la majorité des vents sont de secteur ouest à nord-ouest, c'est le cas des vents moyens à forts, tandis que les vents de vitesse inférieure à 4m/s

sont plutôt de secteur est. Cette fréquence des vents est due à l'absence d'obstacle protégeant la lagune des flux venant de la mer.

«- la houle et le clapot

La houle

La houle, générée par les vents, prédomine dans le domaine océanique.

Sur la côte aquitaine, la climatologie de la houle varie d'une saison à l'autre. Néanmoins, on peut considérer que la houle au large est de secteur nord-nord ouest dominant et de période moyenne 6,5 s, pouvant atteindre exceptionnellement 25 secondes. Sa hauteur significative moyenne annuelle est estimée à 1,36 m, pouvant atteindre près de 10 m lors des tempêtes de printemps ou d'automne [Butel 02].

En arrivant sur la côte, les vagues engendrent des courants moyens particulièrement importants dans la zone de déferlement. Saint Cast [Saint-Cast 02] donne les ordres de grandeur des courants générés par la houle sur les plages du Cap Ferret, côté océan, relevés lors de la campagne d'octobre 2001 du PNEC-ART7 (Programme National d'Environnement Côtier) : une houle frontale de hauteur 3m et de période 13s engendrait des courants de retour (composante transversale du courant moyen, dirigée vers le large) de l'ordre de 50cm/s, quand une houle d'incidence 10°, de hauteur 2,5m et de période 14s, générerait des courants de dérive (composante longitudinale) de l'ordre de 1m/s dans la zone de déferlement.

Une étude réalisée à partir de photographies aériennes et au moyen d'un dispositif de mesures installé au Moulleau et au cap Ferret a montré que, en règle générale, la houle ne dépasse pas la zone des passes. Les passes jouent le rôle d'un véritable filtre qui amortit une partie importante de l'énergie de la houle externe [Gassiat 89].

Le clapot

La présence du clapot est liée au régime des vents : de 30 à 40cm d'amplitude moyenne, sa période n'excède pas 3s. Les vents de secteurs sud à ouest sont particulièrement favorables à la formation de cette agitation, la hauteur d'eau en est un facteur limitant. Le clapot peut avoir une action importante sur les estrans, plages et "crassats" et la fluctuation des vents est à prendre en compte dans l'explication des tendances changeantes à la sédimentation ou à l'érosion de certaines zones du

bassin [Collectif 97].

«- **La marée**

Dans le domaine lagunaire, zone des passes incluse [Gassiat 89], c'est la marée qui est le responsable principal de l'hydrodynamique. Dans les zones côtières de type estuaire, golfe ou lagune, la marée est plus complexe qu'au large en raison de phénomènes hydrauliques locaux : vidange et remplissage de la baie, propagation sur des profondeurs faibles relativement au marnage, courbures des lignes de courant dues aux contours de la côte. Dans ces sites, la marée dépend des forces astrales (voir Glossaire *Marée**) bien sûr mais aussi des échanges d'eau entre l'extérieur et l'intérieur du bassin, et des dimensions de celui-ci.

C'est précisément la marée qui va nous intéresser : dotés de l'outil numérique présenté dans le chapitre 3, qui traite les écoulements tidaux en milieux très peu profonds, nous allons chercher à simuler sa propagation dans la lagune. Il est donc précieux de connaître les caractéristiques observées sur le terrain et que notre modèle devra reproduire.

c - Propagation de la marée dans le bassin : symétrie et déformation de l'onde

Dans le bassin, on observe [L'Yavanc 95], pour l'ensemble des stations d'enregistrement, une marée semi-diurne* **quasiment symétrique en vive eau***, avec une durée du montant* de 6h20 en moyenne et une durée du perdant* légèrement inférieure à 6h00. Cependant, **en morte eau, l'asymétrie devient très nette** avec une durée moyenne du montant de 7h00 et une durée moyenne du perdant de 5h25. Il y a donc une **prédominance marquée du montant dans la lagune**, que nous chercherons à retrouver dans nos simulations.

De même, le plan d'eau se déforme au cours de la pénétration de l'onde de marée à l'intérieur de la lagune.

L'Yavanc [L'Yavanc 95] note qu'au cours de la fin du montant et de la première partie du perdant, particulièrement en morte eau, les décalages de hauteur s'accroissent entre sites. Prenant l'axe Eyrac-Grand Piquey (cf Fig 4.5) comme référence, on observe, lorsque les bancs découvrants sont immergés, un gonflement de quelques centimètres de l'amplitude de l'onde au nord et à l'est de cet axe, en particulier à Arès, tandis qu'une amplitude

moindre caractérise les zones situées au sud et à l'ouest. L'horizontalité du plan d'eau est quasi-revenue en fin de perçant et au premières heures du montant.

Ce phénomène est intéressant dans la mesure où il traduit les effets des estrans sur un écoulement tidal : une dissipation d'énergie due au frottement de l'onde sur ces bancs émergents induit une étale de pleine mer plus longue que l'étale de basse mer et une amplitude plus importante qu'à Eyrac (chenal).

4.1.3 Hydrologie du bassin

a - Apport d'eau douce

On estime à $662.10^6 m^3 .an^{-1}$ l'apport moyen de la Leyre qui se jette dans le bassin, avec des variations mensuelles et annuelles importantes.

Les apports annuels d'eau de pluie sont du même ordre, d'environ $130.10^6 m^3 .an^{-1}$.

b - Apport d'eau de mer

Au niveau des passes, il transite, pendant une marée, entre $130.10^6 m^3$ pour un évènement de morte eau et $370.10^6 m^3$ pour un évènement de vive eau, soit un volume d'environ $182,5.10^9 m^3$ par an.

Ainsi, les apports d'eau douce représentent 0,43% du volume des apports d'eau de mer dans le bassin. Dans notre modèle de l'hydrodynamique du bassin, nous ne considérerons pas cet apport d'eau douce.

4.1.4 Unités et mouvements sédimentaires : observations *in-situ*

Unités sédimentaires

Dans la zone littorale, graviers à débris de coquilles et sables grossiers recouvrent les fonds[Collectif 97].

Sur les deltas de marée, on trouve des sables dunaires fins à moyens.

Des graviers pavent les fonds supérieurs à 15m et les chenaux du bassin où les courants sont les plus violents.

Au sein de la lagune, la morphologie complexe des bancs et des chenaux entraîne une grande disparité dans la distribution des sédiments.

Les travaux de Bouchet (1968) permettent cependant d'en dégager les tendances principales, résumées dans l'étude d'IFREMER [Collectif 97].

Ce sont les sables fins dunaires de diamètre médian compris entre 0,2mm et 0,25mm qui sont les mieux représentés, et moindrement les sables moyens, particulièrement présents sur le banc du Bernet, le banc d'Arguin et les grands chenaux.

Très généralement, les particules fines (diamètre inférieur à 0,063mm) sont plus présentes au fur et à mesure que l'on s'éloigne des passes vers la côte est du bassin et dans les chenaux coupés de la circulation générale.

Processus et bilans hydrosédimentaires

Deux processus sédimentaires antagonistes s'observent dans le bassin : un phénomène d'érosion et un phénomène de comblement et d'engraissement. Stable à long terme, la morphologie de la lagune est très active dans le secteur des passes et d'autant plus lente qu'on s'en éloigne vers l'est. Dans son étude des "Evolutions bathymétriques et morphologiques du Bassin d'Arcachon" [L'Yavanc 95], L'Yavanc procède à la comparaison de cartes bathymétriques datant de 1708, 1826, 1966, 1987, etc. Il en ressort que l'érosion concerne préférentiellement les chenaux, tandis qu'un engraissement lent affecte globalement des zones de platier. L'Yavanc observe que ces mouvements réorganisent à long terme les axes hydrauliques de la circulation générale dans le bassin.

4.1.5 Synthèse

Ainsi, le bassin d'Arcachon présente une topographie complexe, faite de réseaux de chenaux, de bancs de sable et de larges estrans, et son domaine lagunaire est prédominé par les courants de marée. Sa configuration se prête bien à notre modèle développé pour la simulation des écoulements tidaux en milieux peu profonds et la modélisation de la propagation de la marée en son sein va permettre de tester notre outil numérique sur un cas réel et de le valider pour les applications aux environnements côtiers complexes.

4.2 Les paramètres de simulation de l'hydrodynamique du Bassin sous l'action de la marée

Après avoir pris connaissance des particularités de la géomorphologie de la lagune, de son hydrodynamique (notamment de l'onde de marée), de la répartition des sédiments très divers dans la lagune, on entreprend le modèle numérique de la propagation de la marée dans le Bassin d'Arcachon.

Nous décrivons ici les paramètres, numériques et physiques, choisis pour la modélisation de l'hydrodynamique du bassin d'Arcachon.

4.2.1 Emprise du modèle, bathymétrie

Emprise du modèle

L'emprise du domaine est délimitée en longitude par les méridiens $1^{\circ}21'55.3''$ à l'ouest et $0^{\circ}59'48.3''$ à l'est et en latitude à $44^{\circ}27'38.8''$ au nord et $44^{\circ}46'33.5''$ au sud. Les dimensions du domaine sont de $30,8\text{km}$ est-ouest et $36,2\text{km}$ nord-sud.

Bathymétrie

Pour disposer d'une description du fond de la lagune, nous avons numérisé la carte du Service Hydrographique et Océanographique de la Marine (SHOM). La carte utilisée est une édition datant de 1997, construite à partir de sondages effectués entre 1987 et 1989 pour l'intérieur de la lagune, 1995 pour la région du banc du Moulleau et 1996-1997 pour celle des passes. Le modèle topographique obtenu est rectifié par des sondages ponctuels.

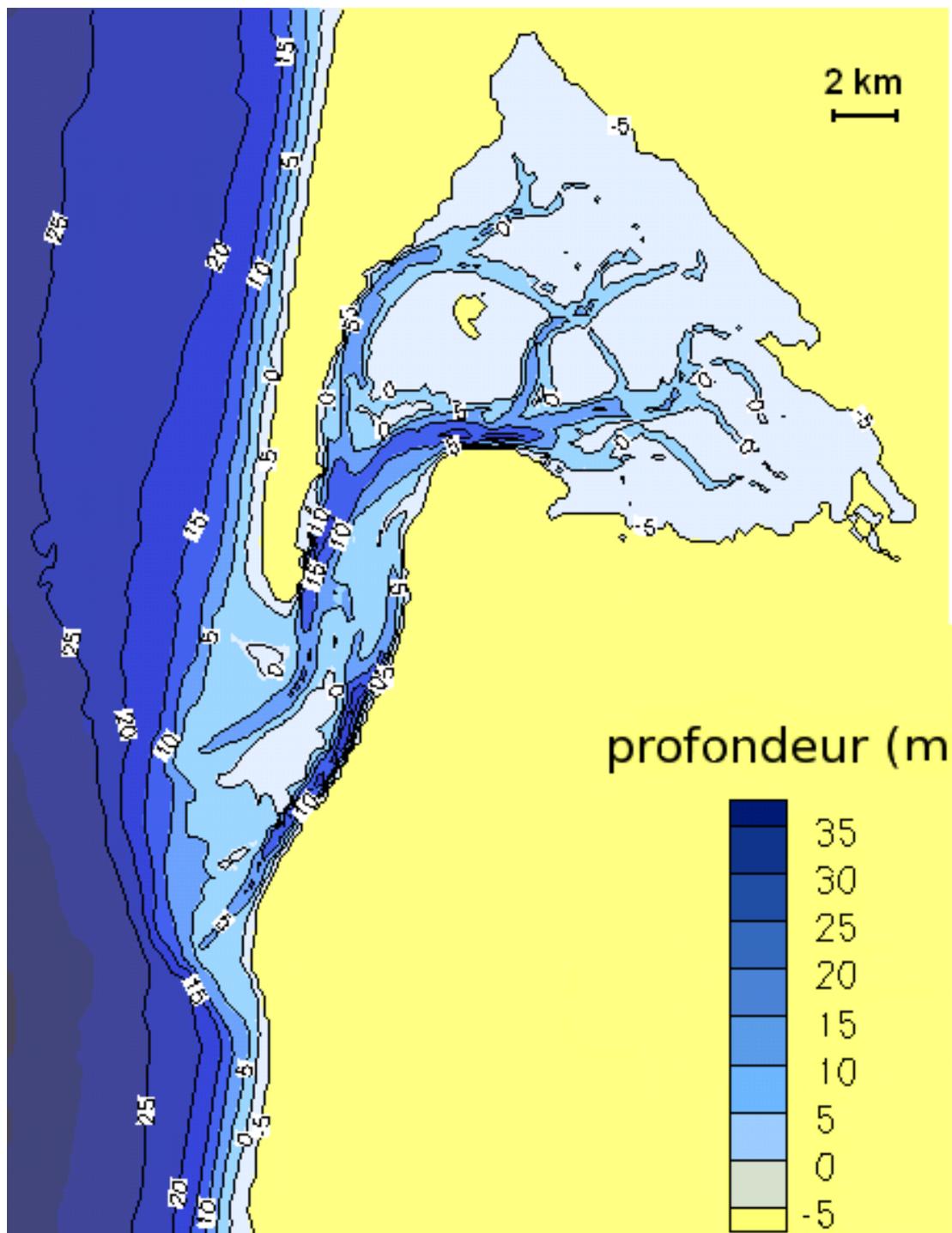


Figure 4.6 : Bathymétrie du bassin.

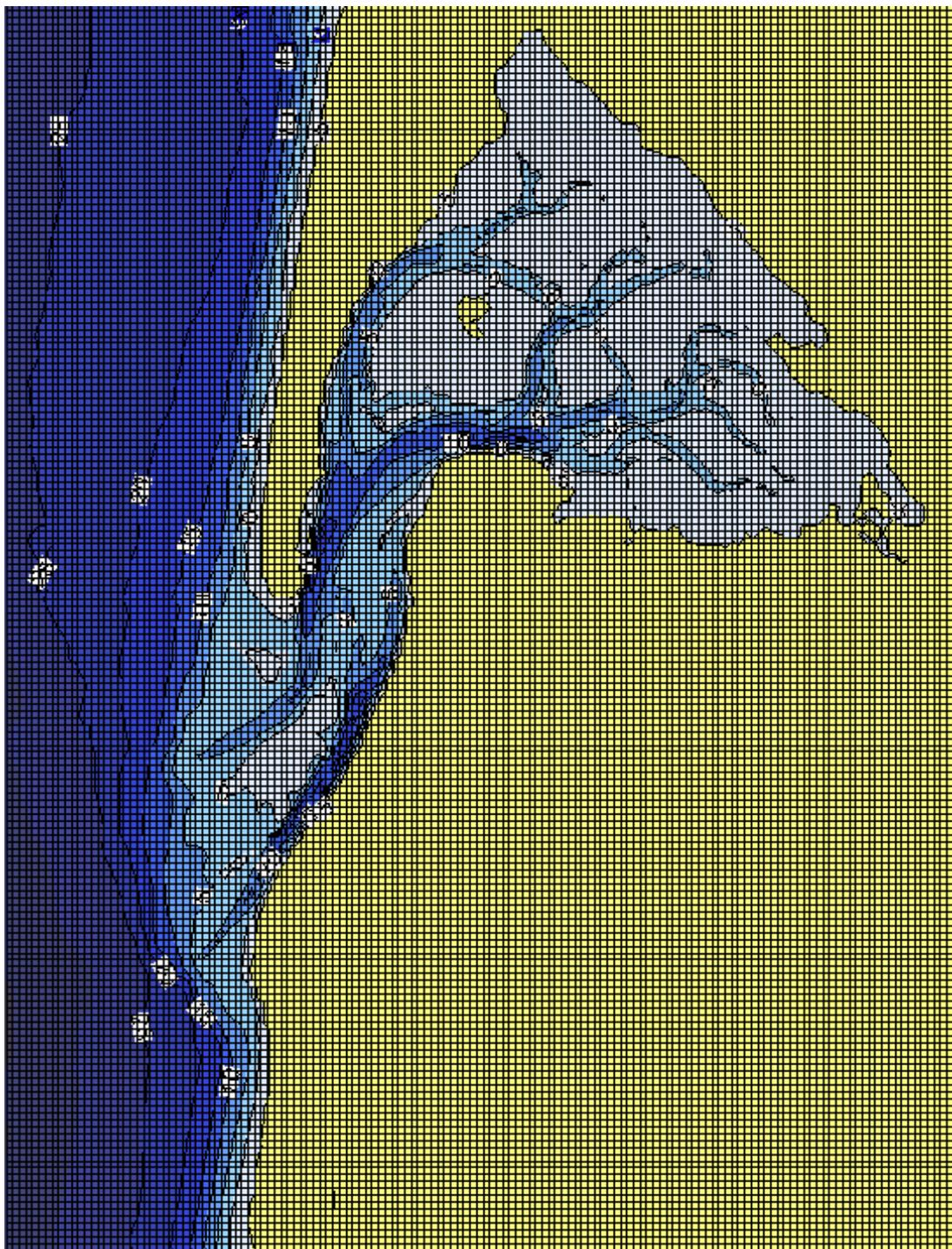


Figure 4.7 : *Maillage du domaine.*

4.2.2 Discrétisations spatiale et temporelle

Maillage

Dans un premier temps, le maillage est choisi relativement lâche, la taille des mailles étant de $200m \times 200m$. Ce maillage peu dense comporte 147×181 soient 26607 mailles (cf Fig. 4.7), ce qui permet un temps de calcul court et une description satisfaisante pour les premiers tests sur le bassin.

Dans un second temps, le code ayant été parallélisé, des maillages denses ont pu être traités pour un même temps de calcul. La partition du domaine en plusieurs sous-domaines traités simultanément par autant de processeurs (un processeur pour chaque sous-domaine).

Pas de temps

La résolution implicite du système des équations de Saint-Venant implémentée dans le modèle et présentée au chapitre 3 garantit, on l'a vu, une convergence numérique dans les situations les plus raides. Sur le bassin, des simulations peuvent être menées avec des pas de temps de 600s pour lesquels le calcul reste stable. Cependant, si par une CFL de 100 le calcul est possible, la physique décrite est moins précise. C'est pour décrire finement la marée que nous choisissons un pas de temps de 20s.

4.2.3 Conditions limites

Comme conditions aux frontières ouvertes du domaine, on impose les hauteurs de marée issues du logiciel IMARS (SEAMER) qui forcent le modèle du bassin d'Arcachon d'IFREMER. Quatre séquences d'une huitaine de jours ont été mises à notre disposition par M. Plus de la station IFREMER d'Arcachon. Ces séquences sont décrites dans le tableau 4.1.

N°	Début de la séquence	Fin de la séquence	Coef. min	Coef. max
1	16/03/1992 0:15	23/03/1992 23:45	71	112
2	22/03/1992 0:15	29/03/1992 23:45	30	63
19	11/03/1993 0:15	18/03/1993 23:45	36	83
22	29/03/1993 0:15	29/03/1992 23:45	40	101

Tableau 4.1 : *Listes des séquences simulées, dates des séquences, coefficients de marée et noms des stations pour lesquelles les champs de hauteurs et vitesses issus de chacun des codes seront comparés.*

Cet ensemble de séquences décrit tout à la fois des marées de vive eau (coefficient supérieurs à 85), des marées moyennes (coefficient compris entre 55 et 85) et des marées de morte eau (coefficients inférieurs à 55).

4.2.4 Les paramètres physiques

Frottement sur le fond

Dans la lagune, la propagation de l'onde de marée est modulée par le frottement qui s'exerce sur le fond et sur les berges des chenaux. En général, les modèles expriment ce frottement, que l'on nommera "frottement hydrodynamique" comme le fait Sottolichio [Sottolichio 99], selon des coefficients empiriques, ajustés localement, de type Strickler ou Chézy. Si l'on choisit d'utiliser le coefficient de Strickler, la contrainte sur le fond s'exprime en fonction du carré de la vitesse moyennée sur la verticale (loi quadratique) et s'écrit :

$$\frac{\tau}{\rho} = \frac{gU^2}{K_s^2 h^{1/3}}$$

où τ est la contrainte de frottement sur le fond, ρ est la densité de l'eau, g est l'accélération de la pesanteur, h la hauteur d'eau, U la norme du vecteur vitesse et K_s le

coefficient de Strickler.

Ce frottement est implémenté dans les équations de mouvement comme terme source (cf Eq. 3.15). L'ajustement de la valeur du coefficient K_s , localement, permettra le calage de l'hydrodynamique du bassin (voir paragraphe 5.3).

type de paroi	coefficient de Stricler K_s ($m^{1/3}s^{-1}$)
acier	de 65 à 100
béton	de 50 à 90
pierre	de 40 à 80
sable	de 45 à 80
gravier	de 20 à 45

Tableau 4.2 : *Quelques exemples de coefficients de frottement pour différents types de contacts, d'après Camenen, 2002 [Camenen 02].*

Tension en surface due au vent

Comme on l'a vu dans la présentation de l'environnement du bassin, le vent a un rôle non négligeable dans l'hydrodynamique de la lagune. Ne disposant pas de données météorologiques sur une séquence de huit à dix marées, nous n'introduisons pas de contrainte horizontale s'exerçant à la surface libre.

Force de coriolis

Nous prenons en compte une autre force extérieure, la force de Coriolis. Le paramètre de Coriolis f s'exprime comme suit :

$$f = 2\omega \sin\phi$$

avec ω la vitesse angulaire de rotation de la Terre, et ϕ la latitude du site (ici $\phi=44^\circ40'$)

Viscosité

Pour toutes les simulations (cas tests standards comme hydrodynamique du bassin), la valeur de la viscosité ν est celle de l'eau. Ce paramètre garde sa signification physique grâce aux méthodes utilisées pour la résolution des équations qui évitent les instabilités numériques. Ainsi, il n'est nul besoin d'augmenter artificiellement ν pour introduire de la diffusion et de lui attribuer un "caractère plus numérique que physique" [Cayocca 96] pour assurer la stabilité du calcul.

g (m/s ²)	ρ (kg/m ³)	ν (m ² /s)	ω (rad/s)
9,81	1000	10^{-6}	$0,7292 \times 10^{-4}$

Tableau 4.3 : Valeurs des constantes physiques adoptées dans le modèle.

Aucune modification numérique des paramètres physiques caractéristiques d'un écoulement tidal en baie peu profonde n'a été nécessaire pour réaliser la propagation de la marée dans une lagune aussi complexe que le Bassin d'Arcachon. Cela nous autorise à penser qu'il en sera de même pour la modélisation de toute autre baie peu profonde dominée par la marée.

4.2.5 Les équations de l'hydrodynamique

Les équations bidimensionnelles de l'écoulement résolues par le code sont les suivantes :

$$\begin{aligned} \frac{\partial h}{\partial t} + \frac{\partial hu}{\partial x} + \frac{\partial hv}{\partial y} &= 0 \\ \frac{\partial(hu)}{\partial t} + \frac{\partial(hu^2)}{\partial x} + \frac{\partial(huv)}{\partial y} - fhv &= -gh \frac{\partial(h+h_b)}{\partial x} + \frac{\partial(\nu h \frac{\partial(u)}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(\nu h \frac{\partial(u)}{\partial y})}{\partial y} - C_f hu \|\mathbf{V}\| - \frac{\nu}{K}(hu) \\ \frac{\partial(hv)}{\partial t} + \frac{\partial(huv)}{\partial x} + \frac{\partial(hv^2)}{\partial y} + fhu &= -gh \frac{\partial(h+h_b)}{\partial y} + \frac{\partial(\nu h \frac{\partial(v)}{\partial x})}{\partial x} + \frac{\partial(\nu h \frac{\partial(v)}{\partial y})}{\partial y} - C_f hv \|\mathbf{V}\| - \frac{\nu}{K}(hv) \end{aligned}$$

$$\text{où } C_f = \frac{g}{K_s^2 h^{1/3}}$$

avec:

u, v :	composantes du vecteur vitesse suivant x et y
ρ :	densité de l'eau
h :	hauteur d'eau
h_b :	élévation du fond
t :	temps
g :	accélération de la pesanteur
f :	paramètre de Coriolis
ν :	viscosité cinématique
κ :	perméabilité
$\frac{\nu}{K}(hu)$, $\frac{\nu}{K}(hv)$:	composantes du terme de Darcy
K_s :	coefficient de Stricler

4.3 Ajustement de l'hydrodynamique du Bassin

Les toutes premières simulations des marées dans le bassin testent d'abord la stabilité du calcul et le comportement de l'hydrodynamique à proximité des zones intertidales. La robustesse du code confirmée, il nous faut maintenant, par comparaison des résultats issus de notre modèle avec les champs de vitesses et de hauteurs observés sur le terrain, ajuster l'hydrodynamique simulée en modifiant localement le coefficient de frottement. On aborde alors les phases dites de "calage" puis de validation du modèle du bassin.

La thèse n'ayant pas permis de travail de terrain, aucune mesure ou relevé n'a été entrepris spécifiquement pour ce travail de modélisation.

Cependant, pour une première appréciation qualitative, la bibliographie nous fournit les résultats issus de campagnes de mesures antérieures. L'analyse de ceux-ci est une référence précieuse pour juger de la validité des champs de hauteur et de vitesses issus de nos simulations.

Enfin, dans le cadre du projet PNEC (Programme National d'Environnement Côtier) - Bassin d'Arcachon (2004-2008), des collaborations inter-établissements s'instaurent et IFREMER met à la disposition du DGO des jeux de données qui permettent plus précisément la réalisation du calage et la validation de notre modèle.

Nous exposons ici comment nous avons procédé, avant de présenter les courbes de hauteur et de vitesse obtenues à l'issue de cette phase de calage puis de les commenter.

4.3.1 Procédure

En l'état, notre modèle ne prend pas en compte le forçage météorologique (vent) (cf équations 4.2.5). Or sur une période d'une dizaine de marées, les conditions climatiques peuvent influencer plus ou moins fortement sur la cote de la surface libre, influence que l'on peut difficilement quantifier en l'absence des données de Météo France concernant la période.

Le calage à partir de mesures *in-situ* n'étant pas envisageable, on procède dès lors par code interposé : le modèle hydrodynamique du bassin d'Arcachon, résolu par le code MARS d'IFREMER, a été préalablement calé et validé à partir de données de terrain

(hauteur, vitesse, force et direction du vent). Sa description générale et sa validation font l'objet d'un rapport interne à IFREMER, rédigé par M. Plus [Plus 04].

De nouvelles simulations, sans prise en compte du forçage météorologique, sont menées au moyen du code Mars. Parallèlement, nous entreprenons des simulations au moyen de notre code avec les mêmes conditions de forçage hydrodynamique (mêmes séquences de marées imposées aux limites des deux modèles) et sur des bathymétries proches.

IFREMER nous communique, pour chacune des quatre séquences de marées simulées, les courbes de hauteurs et de vitesses obtenues en un couple de points du bassin: Eyrac-Arès ou Eyrac-Congre (cf Fig. 4.5).

On compare ces courbes à celles issues de notre modèle, et l'on ajuste au mieux en modifiant localement la valeur du coefficient de frottement K_s initialement uniforme sur tout le domaine.

4.3.2 Données de calage

On a vu que la nature du fond est très diverse au sein de la lagune, allant du sable grossier pavant les chenaux à la vase ou la végétation des platiers. Ces sols très différents induisent des frottements plus ou moins forts qui influent sur le comportement hydraulique local : ralentissement de l'écoulement, réhaussement de la ligne d'eau, ou au contraire glissement facilité par l'état de surface lisse...

L'observation de la morphologie du bassin, de la géométrie et de la section des chenaux, inspire l'idée de régionaliser grossièrement la valeur affectée au coefficient de frottement.

N°	Coef. min	Coef. max	stations de comparaison des simulations
1	71	112	Eyrac, Arès
2	30	63	Eyrac, Arès
19	36	83	Eyrac, Congre
22	40	101	Eyrac, Congre

Tableau 4.4 : *Listes des séquences simulées, coefficients de marée et stations de comparaison.*

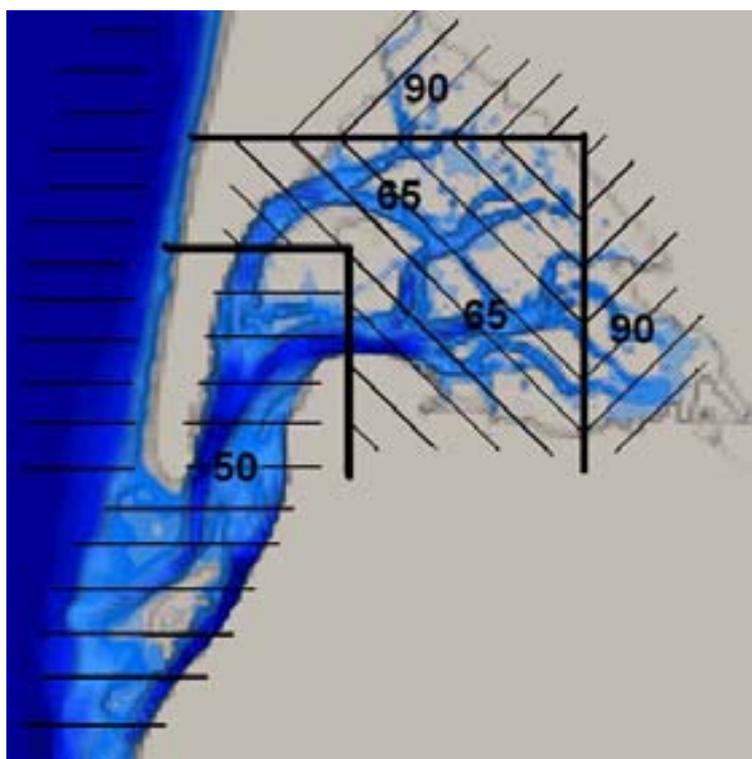


Figure 4.8 : *Cartographie de la valeur du coefficient de Strickler K_s .*

Notre démarche consiste en l'ajustement des champs de hauteurs et vitesses par rapport aux courbes issues des simulations Mars à Eyrac et Arès pour la séquence de marées n°19, cela en modifiant localement la valeur du coefficient de frottement.

Lorsque la concordance est satisfaisante, on valide ce calage par la comparaison des courbes (hauteurs et vitesses) issues des deux codes pour les autres séquences (1, 2 et 22).

Après plusieurs tentatives et corrections, la configuration présentée sur la figure 4.8 est retenue. Trois domaines sont distingués et affectés d'une valeur du coefficient de Strickler différente : $K_s = 50$ pour le large et les passes, $K_s = 65$ pour la région centrale, $K_s = 90$ pour les régions nord et est du bassin.

4.3.3 Validation du modèle en terme de hauteur

Nous présentons ici les comparaisons de codes menées pour les séquences de marées n°19 et n°2.

Les hauteurs de marées imposées aux limites liquides sont représentées figure 4.9, de source IFREMER.

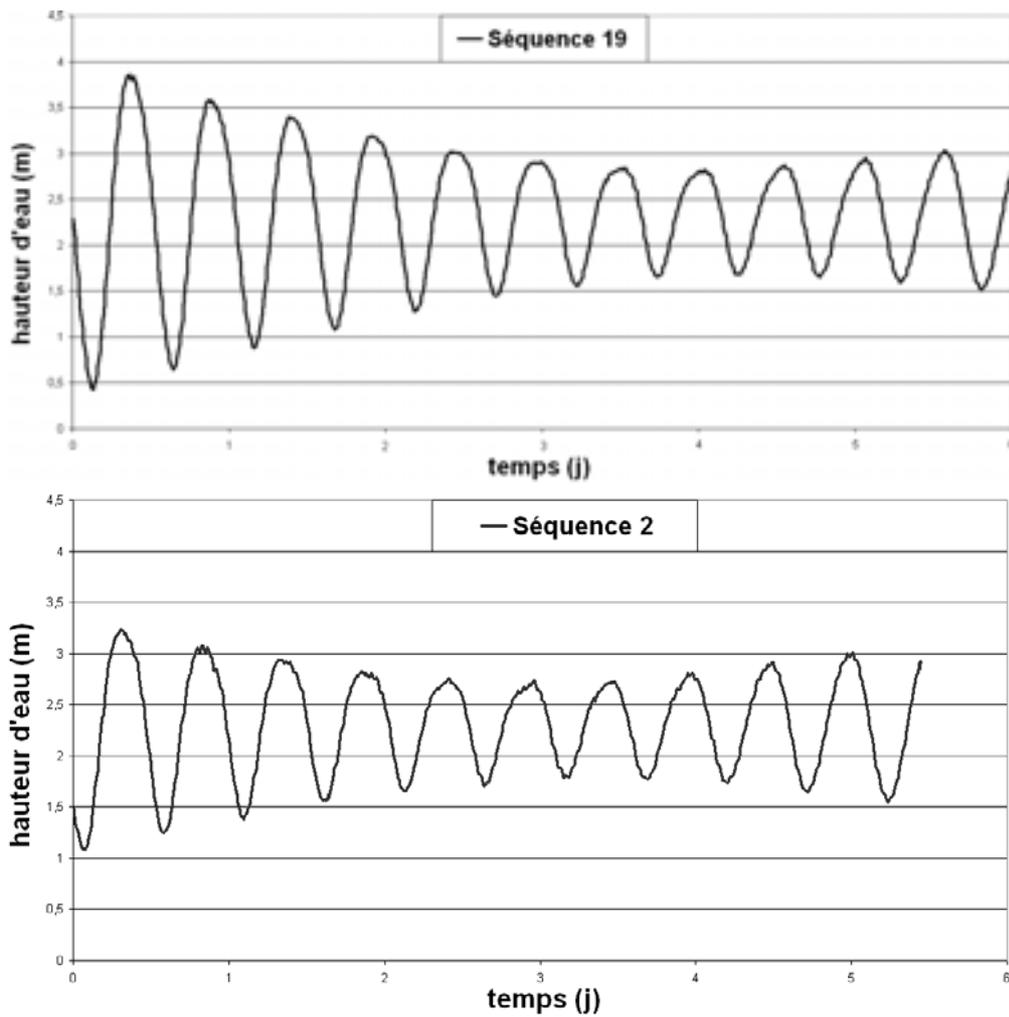


Figure 4.9 : Séquences de marées n° 19 et n° 2 imposées à la frontière liquide du domaine.

Comparaison des courbes

Après avoir régionalisé le coefficient de Strickler, nous comparons ici les courbes de hauteur obtenues par notre code et le code Mars, à Eyrac et Arès pour la simulation de la séquence n°19, à Eyrac et Congre pour la simulation de la séquence n°2.

A Eyrac et Congre, situés dans des chenaux, la concordance est bonne entre les courbes de hauteur issues des deux modèles, pour chacune des séquences simulées 4.10,4.11.

A Arès, située en zone intertidale, on s'aperçoit d'abord que la cote du fond diffère considérablement : notre bathymétrie, d'une source différente de celle d'IFREMER, ne décrit pas à l'identique cette zone. Les écarts observés sur la figure 4.10, courbe du bas, en sont très certainement la conséquence.

Ainsi, les courbes suivent les mêmes tendances, avec une amplitude moindre dans notre modèle.

A la lecture de cette même courbe à Arès, on vérifie le bon traitement des zones sèches : le recollement de la ligne d'eau au fond du bassin lorsque le banc est découvert, puis de décollement à l'immersion du banc, se font de façon très régulière.

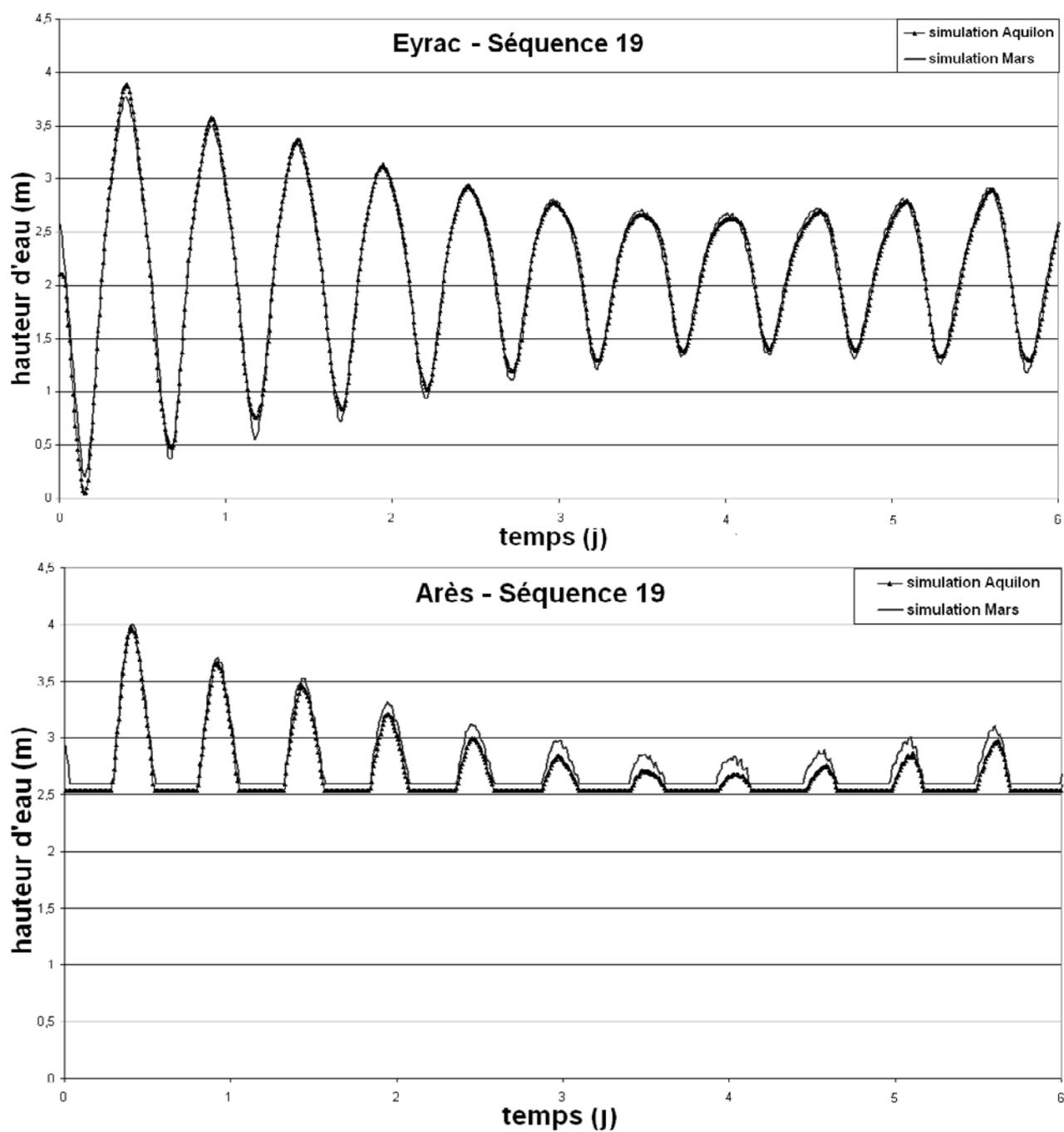


Figure 4.10 : Comparaison des champs de hauteurs obtenus à Eyrac et Arès, pour la simulation de la séquence de marées n° 19 : en noir, nos résultats; en gris, les résultats de code Mars (IFREMER).

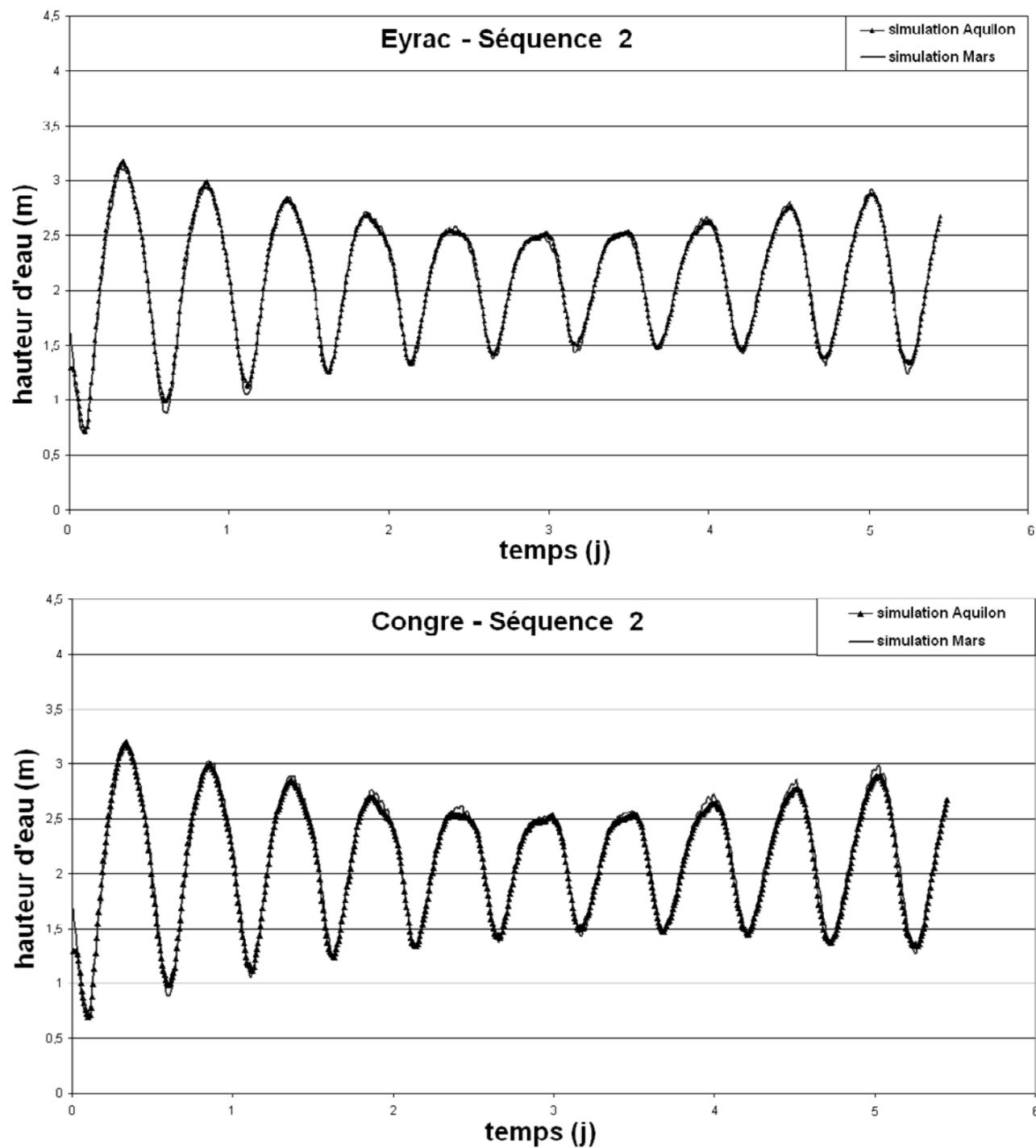


Figure 4.11 : Comparaison des champs de hauteurs obtenus à Eyrac et Congre, pour la simulation de la séquence de marées n°2: en noir, nos résultats; en gris, les résultats de code Mars (IFREMER).

Symétrie et déformation de l'onde de marée

Lors du calage, on vérifie le comportement de l'onde de marée décrit par L'Yavanc [L'Yavanc 95] : on retrouve bien, figures 4.12 et 4.13, ses caractères semi-diurne, quasiment symétrique en vive eau, et l'asymétrie très nette en morte eau. La durée du montant est supérieure à celle du perdant, conséquence de la forte présence de zones intertidales.

L'Yavanc [L'Yavanc 95] note qu'au cours de la fin du montant et de la première partie du perdant, particulièrement en morte eau, les décalages de hauteur s'accroissent entre sites. Lors de nos simulations, le plan d'eau se déforme bien au cours de la pénétration de l'onde de marée à l'intérieur de la lagune.

En effet lorsque les bancs découvrants sont immergés, on observe (cf Fig.4.10) un gonflement de quelques centimètres de l'amplitude de l'onde à Arès par rapport à celle de l'onde obtenue à Eyrac.

Ces lectures très qualitatives des courbes de marées indiquent le bon fonctionnement du modèle qui, malgré les hypothèses simplificatrices propres à la modélisation, reproduit bien le comportement hydraulique de la lagune. Elles rejoignent plus largement les hypothèses, faites par de Van Dongeren et De Vriend en 1994 et vérifiées par Wang [Wang 95], qui énoncent la dépendance de l'asymétrie de la marée par rapport au pourcentage de platiers intertidaux au sein du domaine lagunaire.

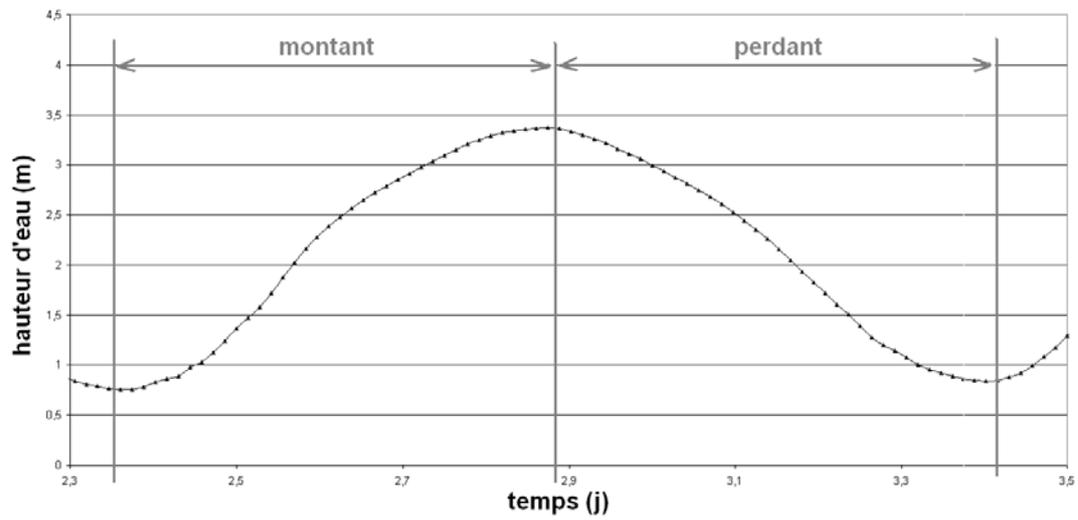


Figure 4.12 : Zoom sur un évènement de marée de petite vive eau : quasi-symétrie de l'onde

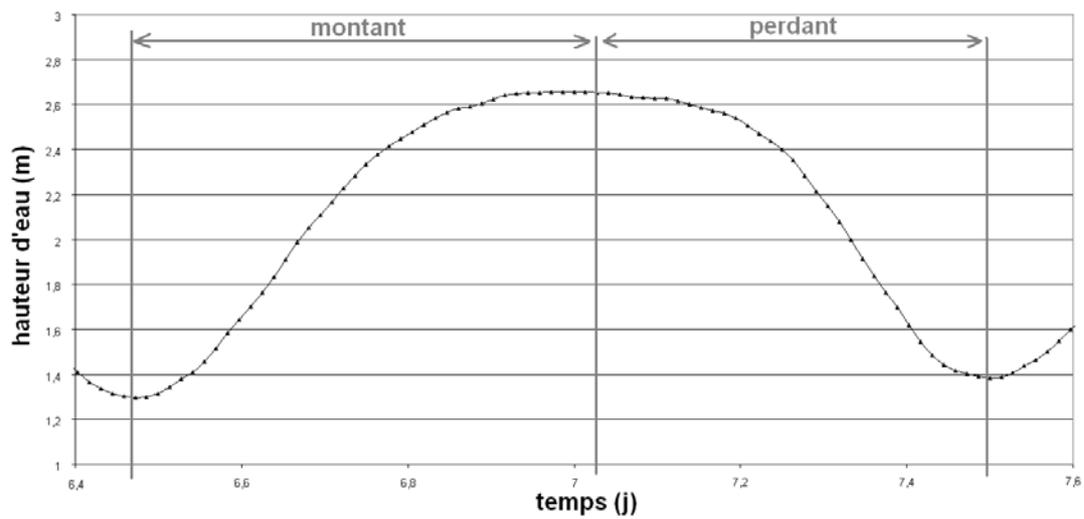


Figure 4.13 : Zoom sur un évènement de marée de morte eau : nette asymétrie de l'onde

4.3.4 Validation du code en terme de vitesse

La validation des champs de vitesses est plus délicate.

Pour son calage, IFREMER compare non pas les normes des vitesses instantanées issues de son modèle avec des mesures effectuées en stations, mais la direction et la vitesse des courants à travers divers transects répartis sur l'ensemble du bassin. Les comparaisons sont menées pour la période du 12 au 14 juin 2002 par marées de coefficients compris entre 76 et 82. Les erreurs sont importantes, une tendance à la surestimation des vitesses par Mars est notée [Plus 04], mais les incertitudes quant aux mesures sont également fortes.

Ici, nous comparons ponctuellement (Eyrac, Arès, Congre) les courbes de la norme de la vitesse instantanée calculée par chacun des deux codes.

Comme le montre la figure 4.14, à Eyrac, l'allure des courbes concorde bien, mais les maxima d'intensité diffèrent considérablement. A Arès, cela est encore plus flagrant, aggravé par une cote du fond au point considéré différente d'un modèle à l'autre.

Les raisons à ces divergences sont nombreuses, la bathymétrie et le maillage modifiant l'environnement de ce point d'un modèle à l'autre.

Il faut donc adopter une approche plus qualitative que quantitative, sans chercher à reproduire exactement les résultats d'IFREMER mais plutôt les tendances des courbes de vitesses.

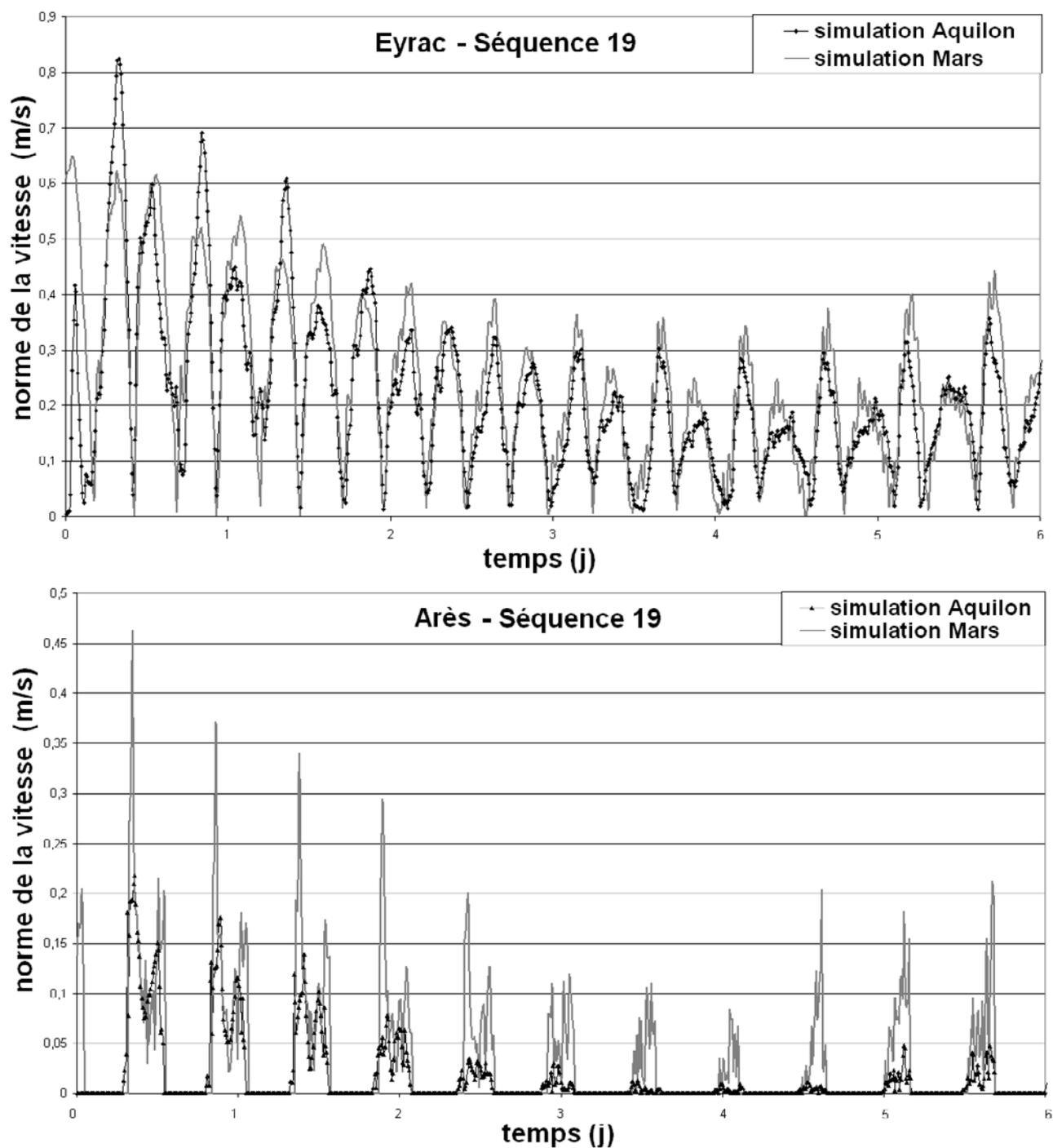


Figure 4.14 : Comparaison des champs de vitesses obtenus à Eyrac et Arès, pour la simulation de la séquence de marées n° 19 : en noir, nos résultats ; en gris, les résultats de code Mars (IFREMER).

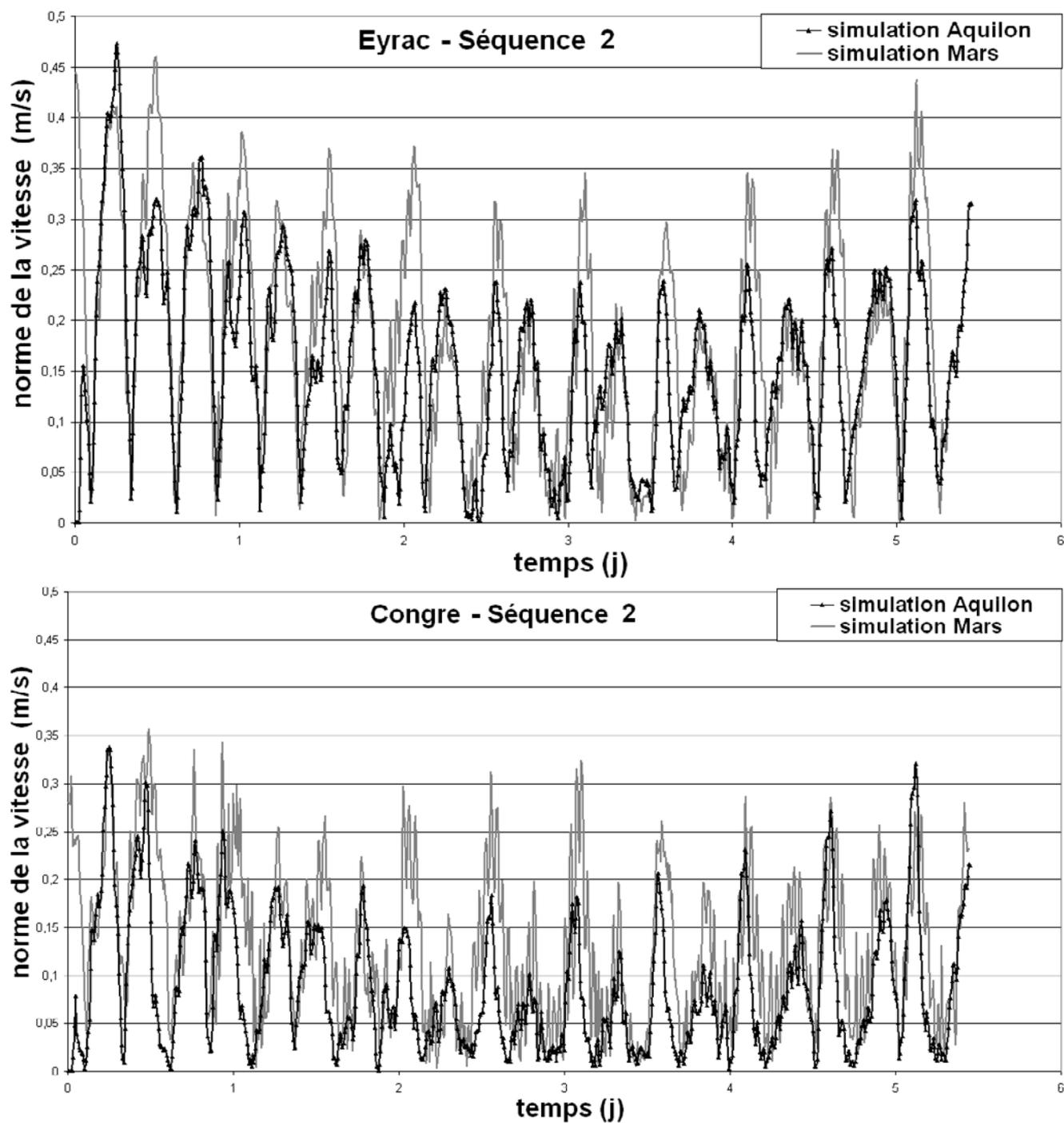


Figure 4.15 : Comparaison des champs de vitesses obtenus à Eyrac et Congre, pour la simulation de la séquence de marées n°2 : en noir, nos résultats; en gris, les résultats de code Mars (IFREMER).

Synthèse

Bien que les hauteurs d'eau issues de notre modèle concordent bien avec les résultats du code Mars, les champs de vitesse simulés peuvent diverger considérablement. Plusieurs raisons peuvent expliquer les différences entre les résultats issus des deux codes.

La principale raison réside dans notre représentation topographique. La maille de 200 m \times 200 m, plus large que celle du modèle d'IFREMER, décrit plus grossièrement la bathymétrie.

Ainsi, dans les zones intertidales et autour d'Arès, on ne prend pas en compte aussi finement les réseaux de chenaux secondaires qui drainent les estrans. Lors de la validation de son modèle, Cayocca [Cayocca 96] est confrontée à une divergence importante entre les vitesses simulées et les mesures dont elle dispose, qu'elle impute en grande partie à une maille trop large (250m de côté).

La taille de la maille induit également le fait que notre modèle ne respecte pas rigoureusement la section des chenaux, les surestimant par endroits. En majorant et minorant alternativement les volumes en jeu dans notre modèle, on sur-estime ou sous-estime les vitesses.

Une autre source de divergence est la méthode numérique, les instabilités et le degré de résolution caractéristiques de chacun des codes.

Il est difficile d'apprécier la part de chacune de ces raisons dans les différences observées. Nous ne chercherons pas cela ici, et nous nous contenterons de cet ajustement de l'hydrodynamique.

Le premier enseignement à tirer de la phase de calage est que le modèle que nous avons construit, sans artifice numérique, réussit à simuler la propagation de plusieurs marées dans une lagune à la topographie aussi complexe que celle du Bassin d'Arcachon. La simulation des séquences de marées fournies par IFREMER est avant tout une validation du modèle physique proposé, des schémas de discrétisation choisis et des méthodes de résolution numériques utilisées.

Ensuite, malgré un maillage relativement grossier et un temps imparti au calage ré-

duit, la concordance est bonne entre nos résultats et ceux issus d'un autre code qui nous tient lieu de référence.

Cette validation donne des indications quant aux améliorations à apporter au code. On pense par exemple à raffiner le maillage autour des fortes pentes existant entre chenaux et les platiers afin de diminuer les sous-estimations ou surestimations des sections de passage. La comparaison directe nos simulations avec des mesures en quelques stations du bassin permettrait de juger des erreurs propres à notre code, ce qui implique l'introduction d'une contrainte surfacique modélisant le vent, les données météorologiques et les hauteurs de marée au large enregistrées pendant les mesures.

En l'absence de ces développements et de mesures *in-situ*, nous jugeons les validations des champs de vitesses et de hauteurs qualitativement satisfaisante pour envisager une étude plus physique de l'hydrodynamique de la lagune.

4.4 Exploitation des champs instantanés

Confortés par la phase de calage qui assure du bon comportement de notre modèle, nous entreprenons maintenant l'étude des écoulements dans le Bassin d'Arcachon.

Nous présentons ici ses principales caractéristiques, observées à partir des champs instantanés de hauteurs et vitesses.

Puis, en extrayant de ces champs des grandeurs pertinentes, nous tentons de déduire les grandes tendances du bassin.

Enfin, nous proposons un exemple d'application du code pour résoudre un problème d'ingénierie.

4.4.1 Validité du modèle

Tout d'abord, les champs de hauteurs, reproduits sur la figure 4.16, attestent de la bonne pratique du drainage et de l'immersion régulière des estrans sur l'ensemble du domaine modélisé.

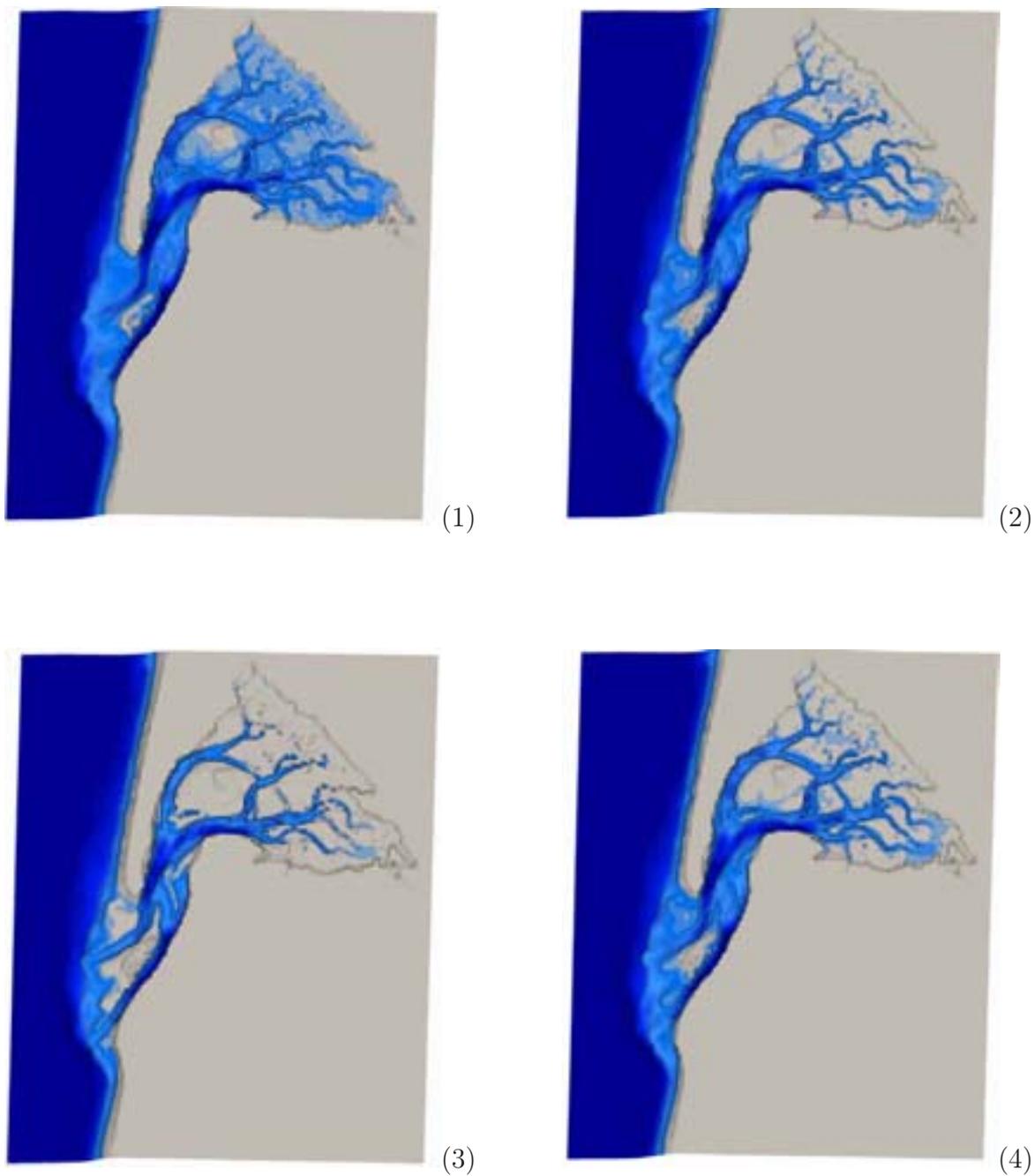


Figure 4.16 : *Champs de hauteurs à marée haute (1), mi-jusant (2), marée basse (3) et mi-flot (4).*

Ensuite, l'observation pas à pas de la propagation de la marée dans l'ensemble de la lagune nous renseigne d'une part sur la stabilité et le bon fonctionnement du modèle, d'autre part sur le comportement hydraulique typique des différentes régions du bassin. La série de figures 4.17, 4.18, 4.19 qui suit reproduit les vitesses obtenues (norme et vecteurs) pour une marée de petite vive eau immergeant puis émergeant progressivement les zones intertidales.

En annexe A est reproduite plus précisément la marée A.1, A.2, A.3, A.4, A.5, A.6, A.7, A.8, A.9.

La ligne noire épaisse est l'interface zone mouillée/zone sèche repérée par la fonction de phase. En la superposant au champ de la norme de la vitesse, on observe bien la faible intensité des vitesses à l'interface domaine immergé/domaine émergé, sans anomalie ou pic d'intensité. L'immersion et l'émergence des bancs intertidaux sont très régulières, et ne génèrent pas de gradients de vitesses aberrants à l'interface des deux domaines.

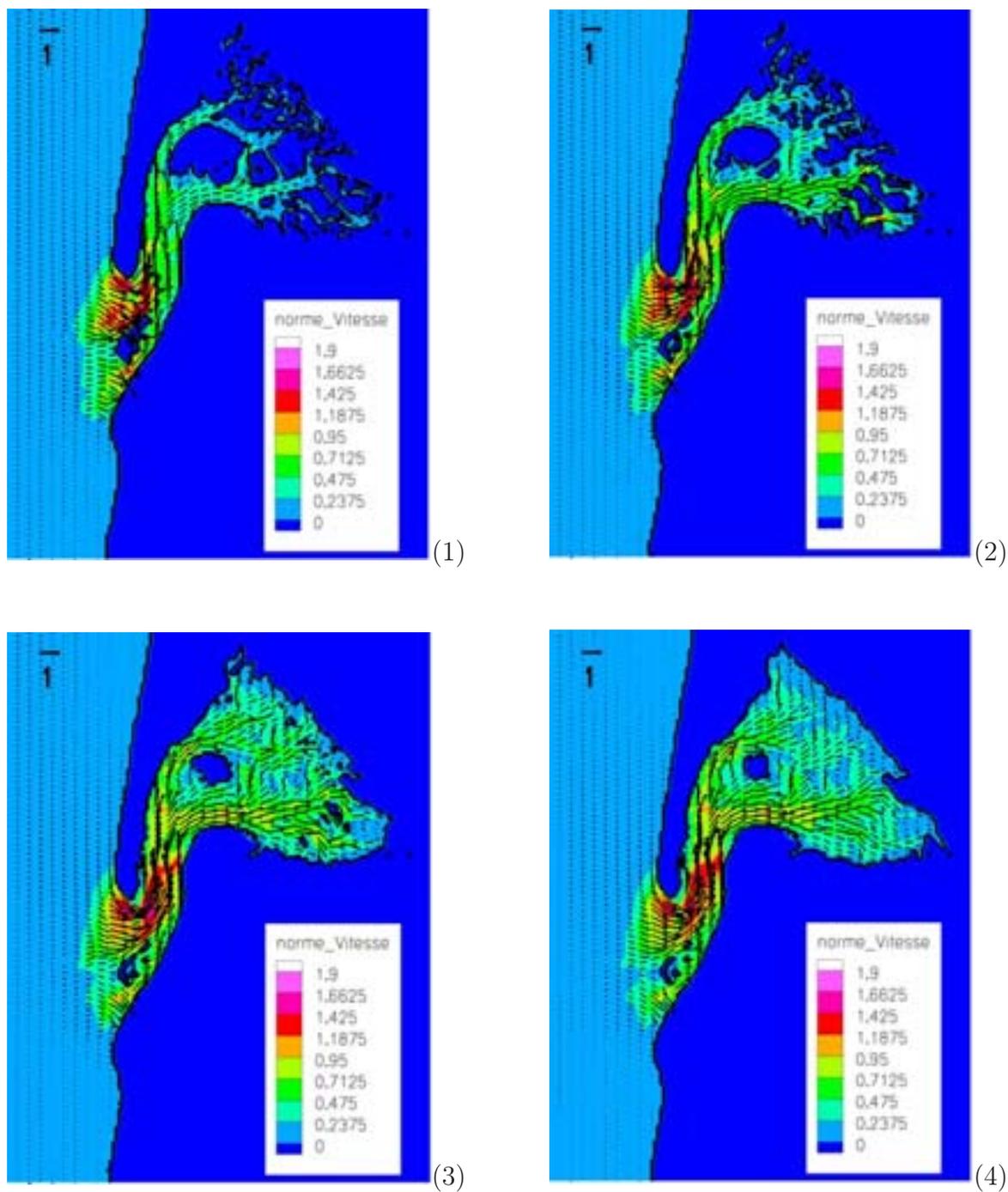


Figure 4.17 : Superposition du champ du vecteur vitesse, de sa norme et de la frontière zone sèche/zone mouillée durant la simulation de la séquence n° 19, aux temps: (1) $t = 5\text{h } 33\text{min } 20\text{s}$; (2) $t = 6\text{h } 26\text{min } 40\text{s}$; (3) $t = 7\text{h } 20\text{min } 00\text{s}$; (4) $t = 8\text{h } 13\text{min } 20\text{s}$.

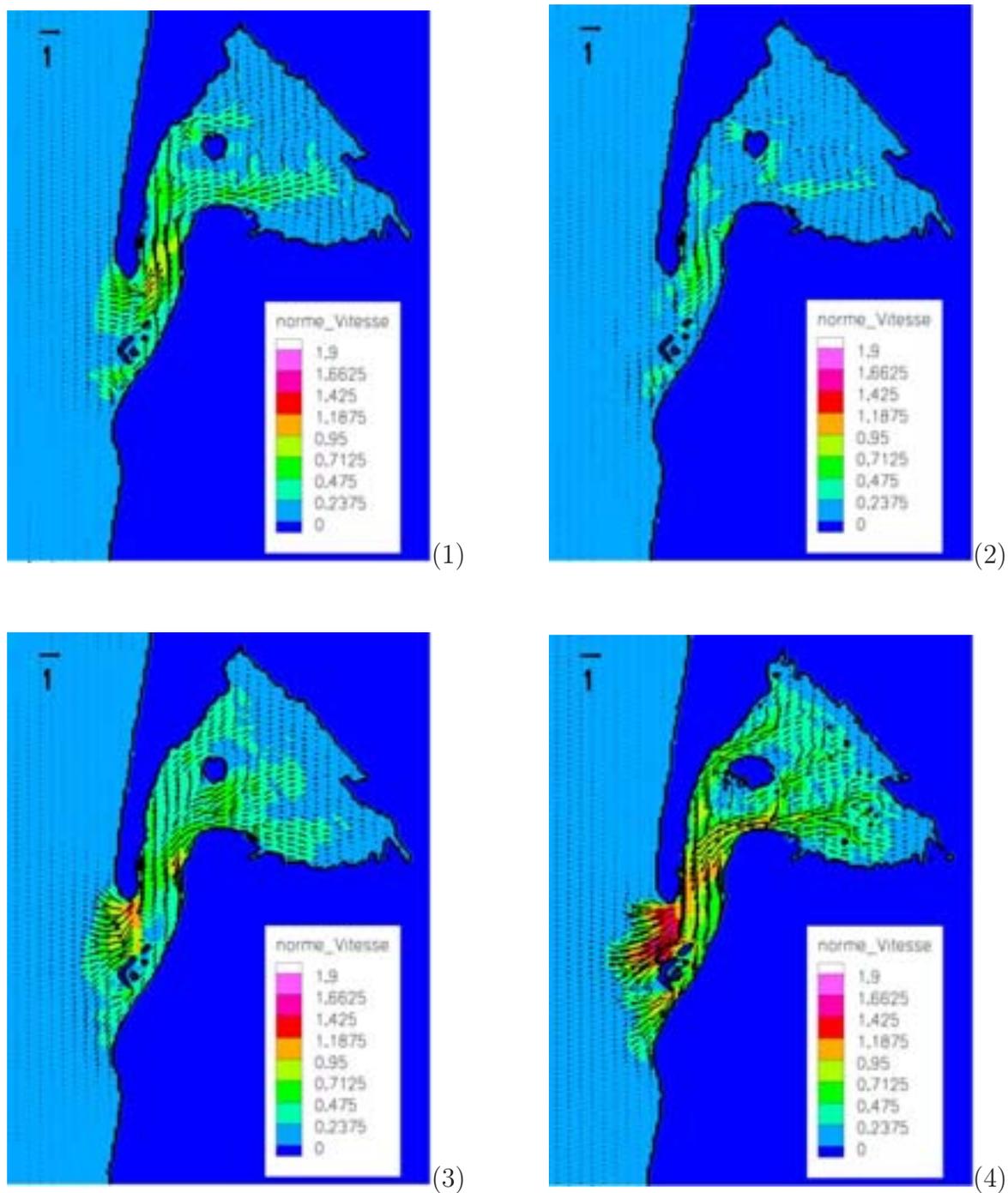


Figure 4.18 : Superposition du champ du vecteur vitesse, de sa norme et de la frontière zone sèche/zone mouillée durant la simulation de la séquence n° 19, aux temps: (1) $t = 9\text{h } 06\text{min } 40\text{s}$; (2) $t = 9\text{h } 33\text{min } 20\text{s}$; (3) $t = 10\text{h } 33\text{min } 20\text{s}$; (4) $t = 11\text{h } 40\text{min } 00\text{s}$.

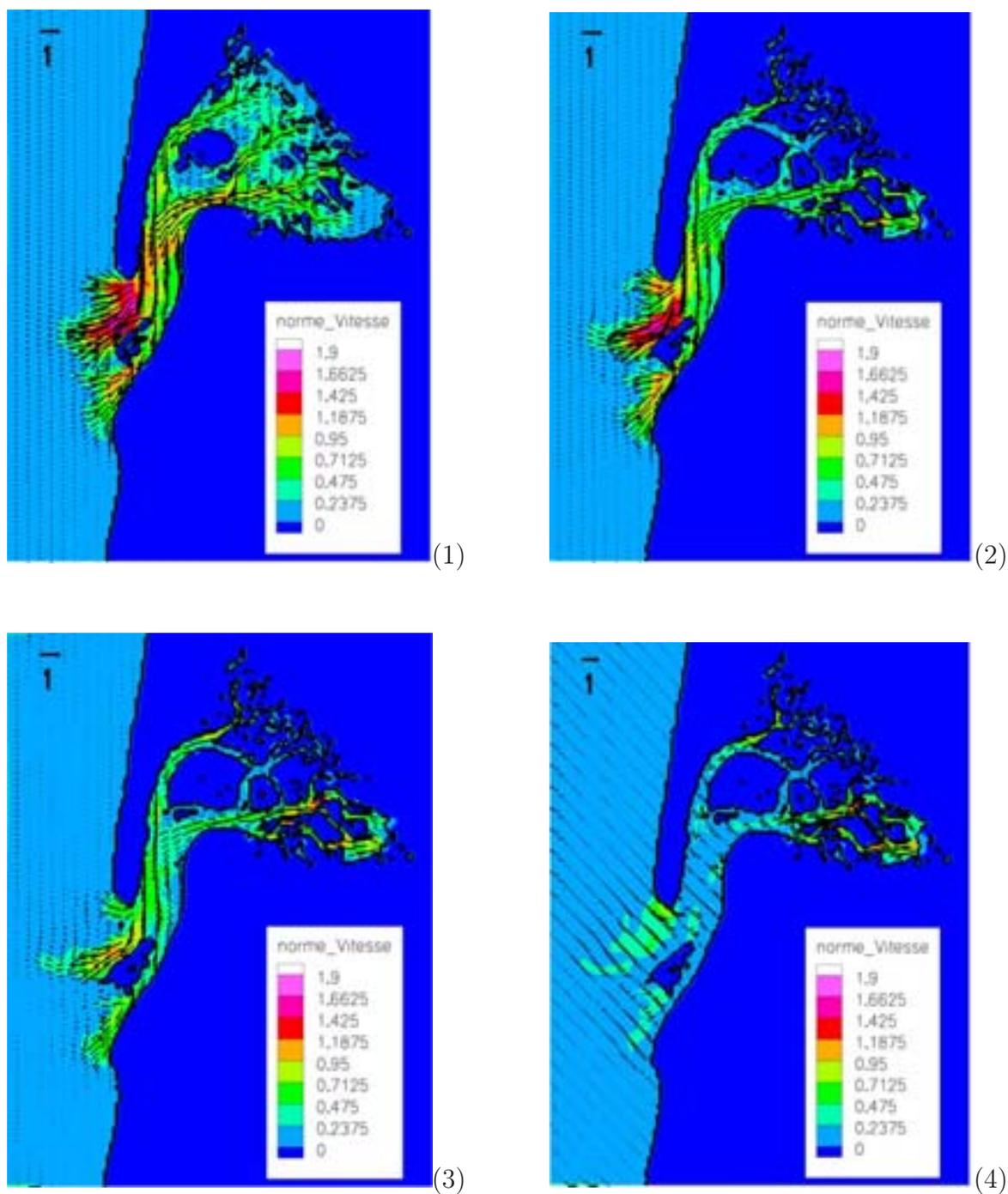


Figure 4.19 : *Superposition du champ du vecteur vitesse, de sa norme et de la frontière zone sèche/zone mouillée durant la simulation de la séquence n° 19, aux temps: (1) $t = 12h 13min 20s$; (2) $t = 13h 30min 20s$; (3) $t = 14h 57min 00s$; (4) $t = 16h 03min 40s$*

Pour une évaluation plus précise du fonctionnement du code, nous avons observé, le long d'un transect situé aux environs d'Eyrac (cf Fig. 4.20), l'évolution simultanée de la cote de la surface libre et du profil de la composante du vecteur vitesse normale au plan de coupe. La coupe englobe la rade d'Eyrac, la berge qui la borde au sud et la zone de slikke au nord qui la rattache à l'Île aux Oiseaux. Le système chenal/zone intertidale considéré permet de vérifier notre traitement des zones sèches dans un cas réel 2D, après l'avoir validé sur les cas 1D inspirés de Balzano (cf § 4.).

La figure 4.21 reporte les surfaces libres calculées pour différents instants pris en début de séquence 2. On s'intéresse ici au comportement de cette surface libre vis à vis de la bathymétrie. En zone sèche, la ligne d'eau épouse parfaitement la forme du fond, on n'observe aucune instabilité à l'interface mouillé/sec, et ce pour une hauteur-seuil ϵ (cf § 3.) fixée à 10cm.

La figure 4.22 montre, pour le flot et puis pour le jusant, deux états de la surface libre et leurs profils de vitesse aux mêmes instants, superposés à la bathymétrie. L'écoulement s'annule effectivement en zone sèche, et les profils sont très réguliers, sans pic d'intensité à l'interface domaine immergé/domaine émergé.

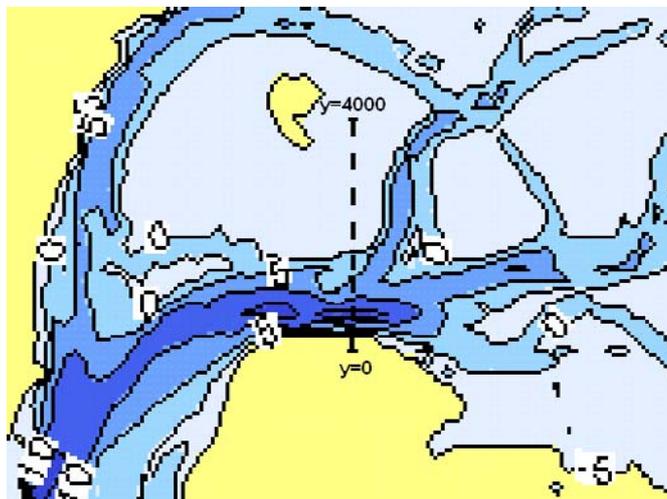


Figure 4.20 : Localisation du transect choisi pour l'observation du fonctionnement numérique du modèle.

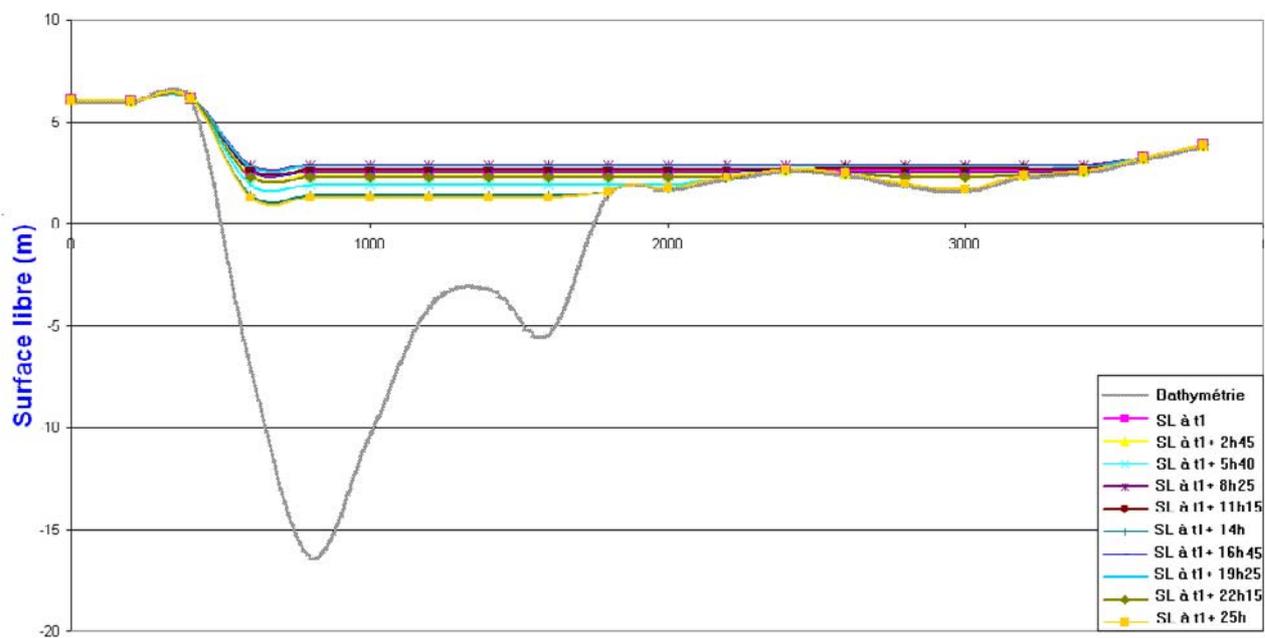


Figure 4.21 : Surfaces libres à différents instants d'une marée.

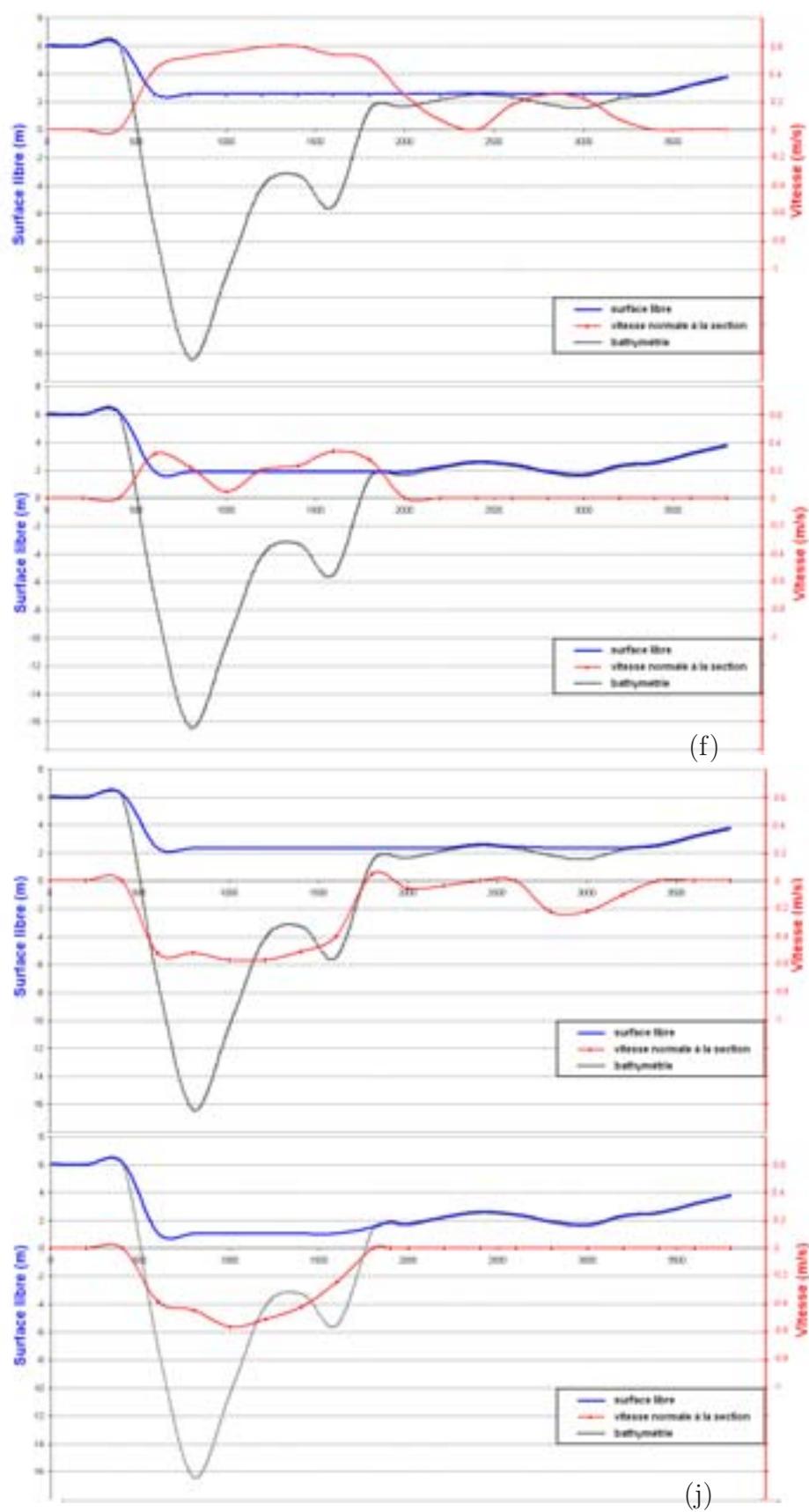


Figure 4.22 : Surfaces libres et profils de vitesse instantanés le long du transect, (f) en flot, (j) en jusant.

4.4.2 Les tendances hydrodynamiques

Ainsi, les champs instantanés nous assurent de la validité de la méthode numérique ici éprouvée sur un cas complexe réel.

La simple lecture des champs instantanés calculés pendant un flot et un jusant met également en évidence des comportements hydrauliques décrits dans la littérature par des observations *in-situ* et par les campagnes de mesures antérieures.

Les maxima d'intensité de la vitesse se situent au niveau des passes, où la norme peut dépasser $1m/s$.

Ils se produisent à mi-flot et mi-jusant, avec une supériorité des courants de jusant au-dessus du delta de jusant (cf Fig. A.7(2)).

De manière générale, les vitesses les plus fortes concernent les chenaux et plus précisément ceux de la partie sud de la lagune.

Les vitesses calculées au nord de l'île aux Oiseaux sont toujours plus faibles.

Les phénomènes de retard de la propagation de l'onde dans la lagune sont particulièrement visibles sur la figure A.9(4), où l'on observe la renverse : alors que le flot débute dans les passes, le jusant n'est pas achevé dans la partie est du bassin.

4.5 Grandeurs caractéristiques de l'hydrodynamique

L'écoulement induit un transport sédimentaire qui lui-même, s'il n'est pas uniforme, induit une modification de la cote du fond. Pour prédire l'évolution future de la bathymétrie, sont développés des modèles morphodynamiques qui, à des échelles de temps différentes, calculent les variations des champs de hauteur, de vitesse et de transport, puis celles de la cote du fond.

Avant la mise en place d'un tel modèle dans notre code de calcul, on peut, à partir des seuls champs hydrodynamiques, émettre des hypothèses quant aux tendances sédimentaires potentielles. Ces hypothèses demandent bien sûr une validation au moyen d'un modèle de transport, mais considérées avec grande prudence, elles corroborent les observations retranscrites dans la littérature.

Afin de les mettre en évidence, nous calculons trois grandeurs caractéristiques. Leurs cartographies, lues en parallèle, vont faire apparaître des tendances pour chaque région de la lagune, et offrir une interprétation en terme de transport sédimentaire.

4.5.1 Maximum de la vitesse sur un cycle

La première grandeur que l'on considère est le maximum de la vitesse.

En chaque point du maillage, on retient le maximum de la norme de la vitesse obtenue au cours d'un cycle de marée. Si ce maximum se produit au cours du jusant, on lui attribue un signe négatif. Si ce maximum se produit au cours du flot, on lui attribue un signe positif. Puis ces maxima, *a priori* obtenus à des instants différents, sont représentés sur une même carte et ce pour une marée de grande vive eau, une marée de petite vive eau et une marée de morte eau (cf Fig. 4.23, 4.24).

Pour les trois événements de marée considérés, les plus forts maxima d'intensité sont localisés dans la région des passes, en flot pour les bancs émergents des passes internes (banc du Bernet) et externes (Banc du Toulinguet), en jusant à la pointe du Cap Ferret, dans le chenal du Ferret. On note cependant que pour de très forts coefficients de marée, le jusant prédomine généralement les passes externes, banc du Toulinguet compris.

Le jusant prédomine très largement dans les chenaux principaux et le sud du bassin, une prédominance du flot caractérisant le nord de la lagune et les chenaux de liaison, cela quelque soit le coefficient. Les intensités de maxima calculés pour les trois événements sont globalement supérieures au sud qu'au nord.

La partie sud-ouest de l'Île aux Oiseaux connaît des courants de flot relativement forts comparés aux maxima de flot observés dans le domaine lagunaire, par moyenne ou grande vive eau.

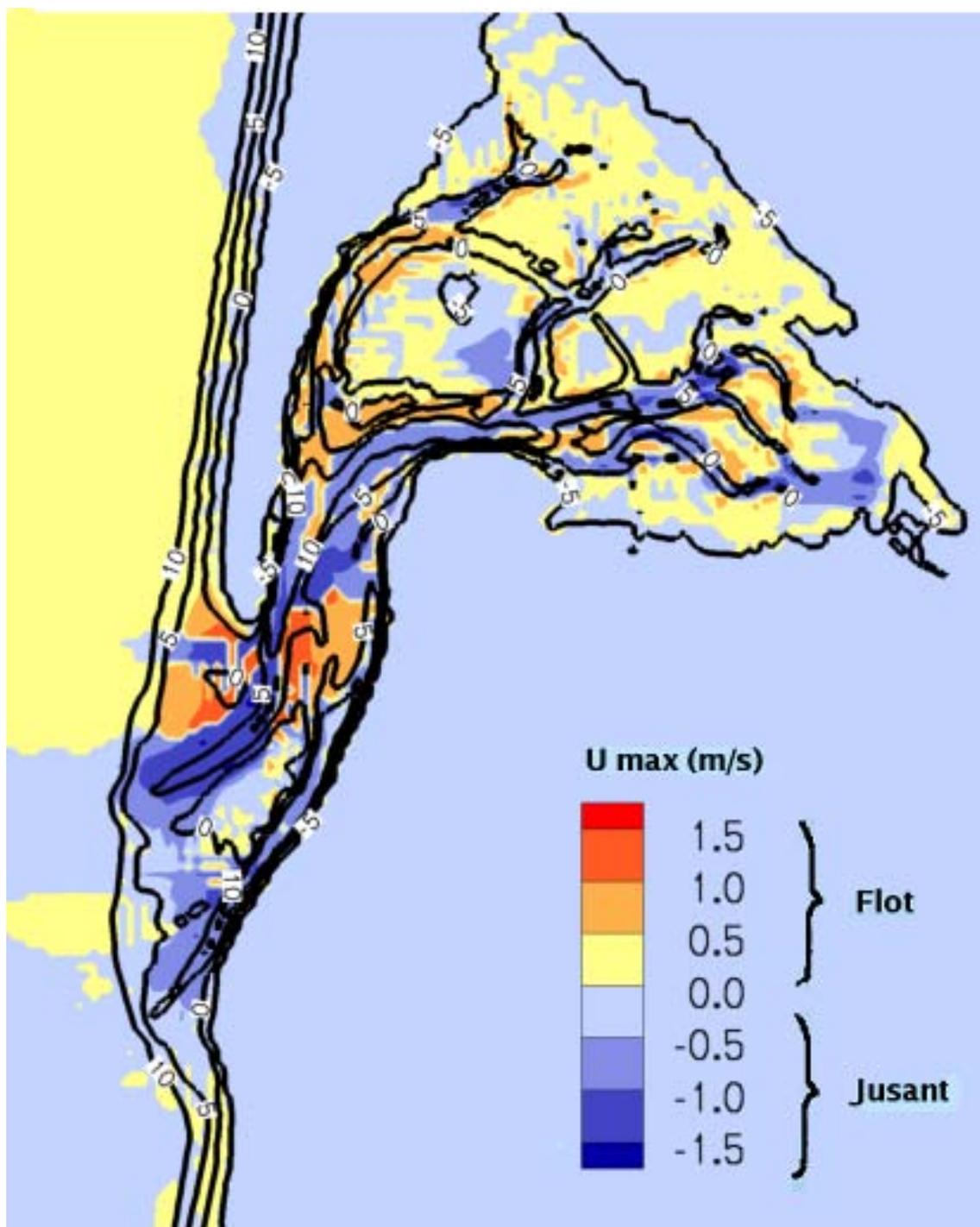


Figure 4.23 : Cartographie du maximum de la vitesse obtenu au cours d'un cycle de marée de petite vive eau (coef. 70).

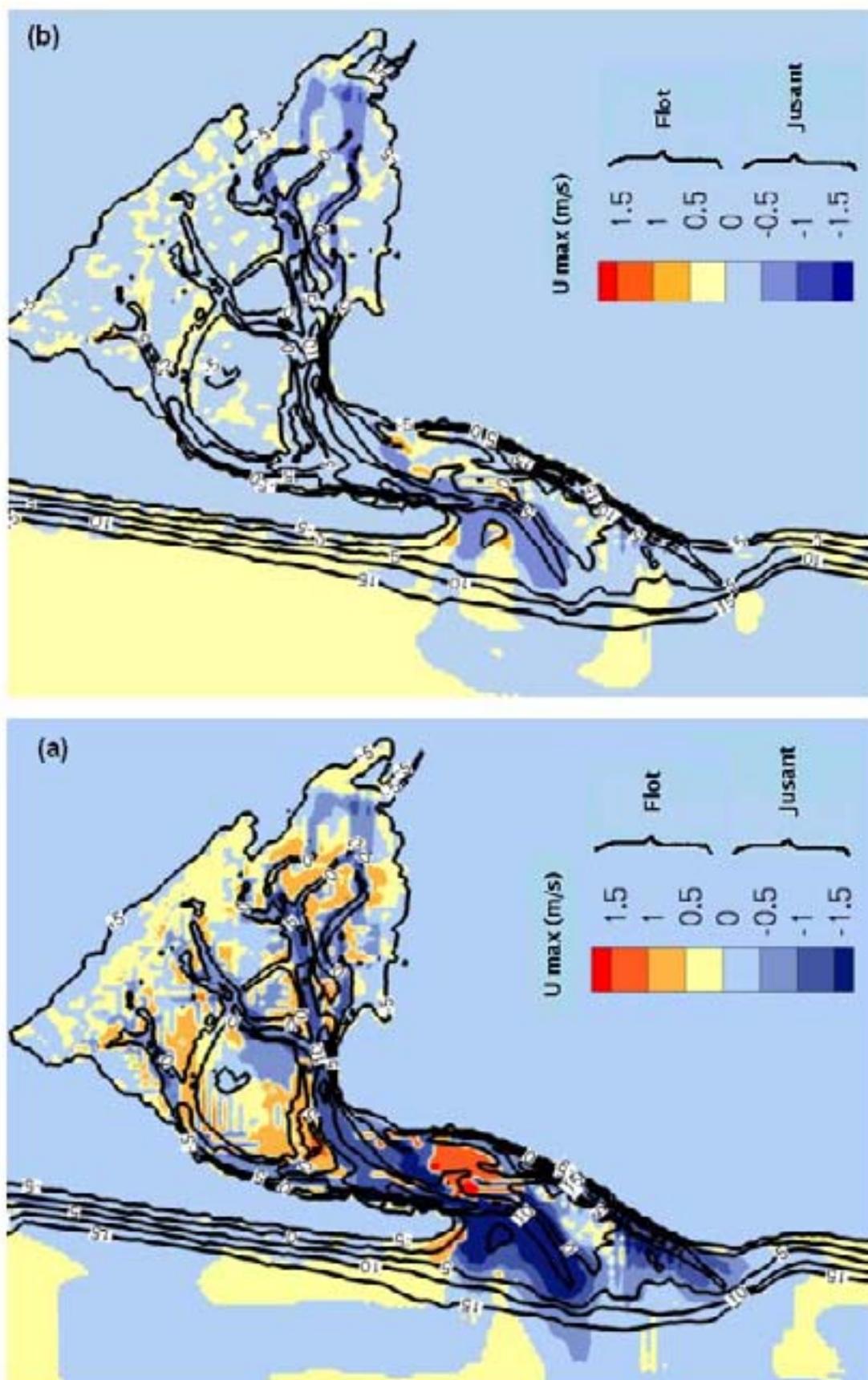


Figure 4.24 : Cartographie du maximum de la vitesse obtenu au cours d'un cycle de marée de grande vive eau (coef. 100)(a) et de morte eau (coef. 50)(b).

4.5.2 Maximum de la vitesse de frottement sur un cycle

La seconde grandeur à laquelle nous nous intéressons est la vitesse de frottement u^* .

Plus représentative du point de vue de la dynamique sédimentaire, la vitesse de frottement renseigne sur les zones fortement contraintes par le courant, potentiellement sujettes à l'érosion si le substrat s'y prête.

En effet, la vitesse de frottement u^* est associée à la contrainte τ exercée par le fluide sur le fond. Or celle-ci constitue une quantité primordiale pour le transport sédimentaire puisqu'elle représente la force motrice susceptible de déplacer le sédiment.

Les formules de transport de sédiment considérant le transport par charriage, type Meyer-Peter ou Engelung et Hansen, font intervenir cette contrainte sur le fond exercée par le fluide. τ doit excéder la contrainte-seuil τ_c pour déplacer le grain et le débit solide entraîné Q_s est alors égal, selon Meyer-Peter, à :

$$Q_s = A(\tau - \tau_c)^{3/2} \quad (4.1)$$

Avec A fonction de la masse volumique du sédiment et de l'eau et du diamètre moyen du grain.

τ s'exprime comme suit :

$$\tau_0 = \rho(u^*)^2 \quad (4.2)$$

u^* est donc directement liée à la capacité de transport du courant. Le frottement est cette fois calculé en fonction de la longueur de rugosité du fond z_0 :

$$u^* = U \left(\frac{K_m}{\ln\left(\frac{h}{z_0}\right) - 1} \right) \quad (4.3)$$

Avec K_m , la constante de Von Karman, $K_m = 0,4$.

Nature du sédiment	$z_0(cm)$
Vase ou Sable vaseux	0,05
Sable très fin	0,1
Sable fin	0,3 à 0,5
Sable moyen	0,6
Sable grossier	0,6
Gravier	0,3
Gravier et Cailloutis	0,3
Cailloutis et Gravier	0,32
Cailloutis et Galet	0,45

Tableau 4.5 : *Quelques exemples de valeurs z_0 pour différents types de sédiment.*

Ce choix d'une expression du frottement différente de celle utilisée pour le frottement hydrodynamique (cf. § 5.2.6), inspiré des travaux de Cayocca ou Sottolichio [Cayocca 96, Sottolichio 99], s'explique par la volonté de prendre ici en compte plus précisément le type de sol et de grain dans les différentes régions de la lagune où coexistent une grande diversité de sédiments (sable grossier, fin, vase, etc.).

Du reste, les deux expressions sont très proches, et l'on retrouve la formule des "sédimentologues" à partir de la formule des "hydrauliciens" en considérant que le profil de la vitesse sur la colonne d'eau suit une loi logarithmique (théorie de la longueur de mélange de Prandtl).

$$u(z) = \frac{u^*}{K_m} \ln \left(\frac{z}{z_0} \right) \quad (4.4)$$

En chaque point du maillage, on retient le maximum de u^* obtenu au cours d'un cycle de marée. Si ce maximum se produit au cours du jusant, on lui attribue un signe négatif. Si ce maximum se produit au cours du flot, on lui attribue un signe positif. Enfin ces maxima, *a priori* obtenus à des instants différents, sont cartographiés et ce pour une marée de grande vive eau, une marée de petite vive eau et une marée de morte eau (cf Fig. 4.25, 4.26).

Pour les trois évènements de marée considérés, les maxima de la vitesses de frottement les plus intenses sont localisés dans la région des passes, en flot pour les bancs émergents des passes internes (banc du Bernet) et externes (Banc du Toulinguet), en jusant à la pointe du Cap Ferret, dans le chenal du Ferret. Comme dans le cas des vitesses maximum, pour de très forts coefficients de marée, le jusant prédomine généralement les passes externes, banc du Toulinguet y compris.

Les forts potentiels d'arrachement en jusant concernent les chenaux principaux et le sud du bassin, en flot ils se manifestent au sud-ouest de l'Île aux Oiseaux, et plus faiblement, sur les zones intertidales du nord de la lagune et dans les chenaux de liaison, cela quelque soit le coefficient. Les intensités de maxima calculés pour les trois évènements sont globalement supérieures au sud qu'au nord du bassin.

Pour les trois coefficients, le contraste nord/sud et zones intertidales/chenaux est très net, les premiers caractérisés par un maximum du potentiel d'arrachement réalisé en flot, les seconds en jusant.

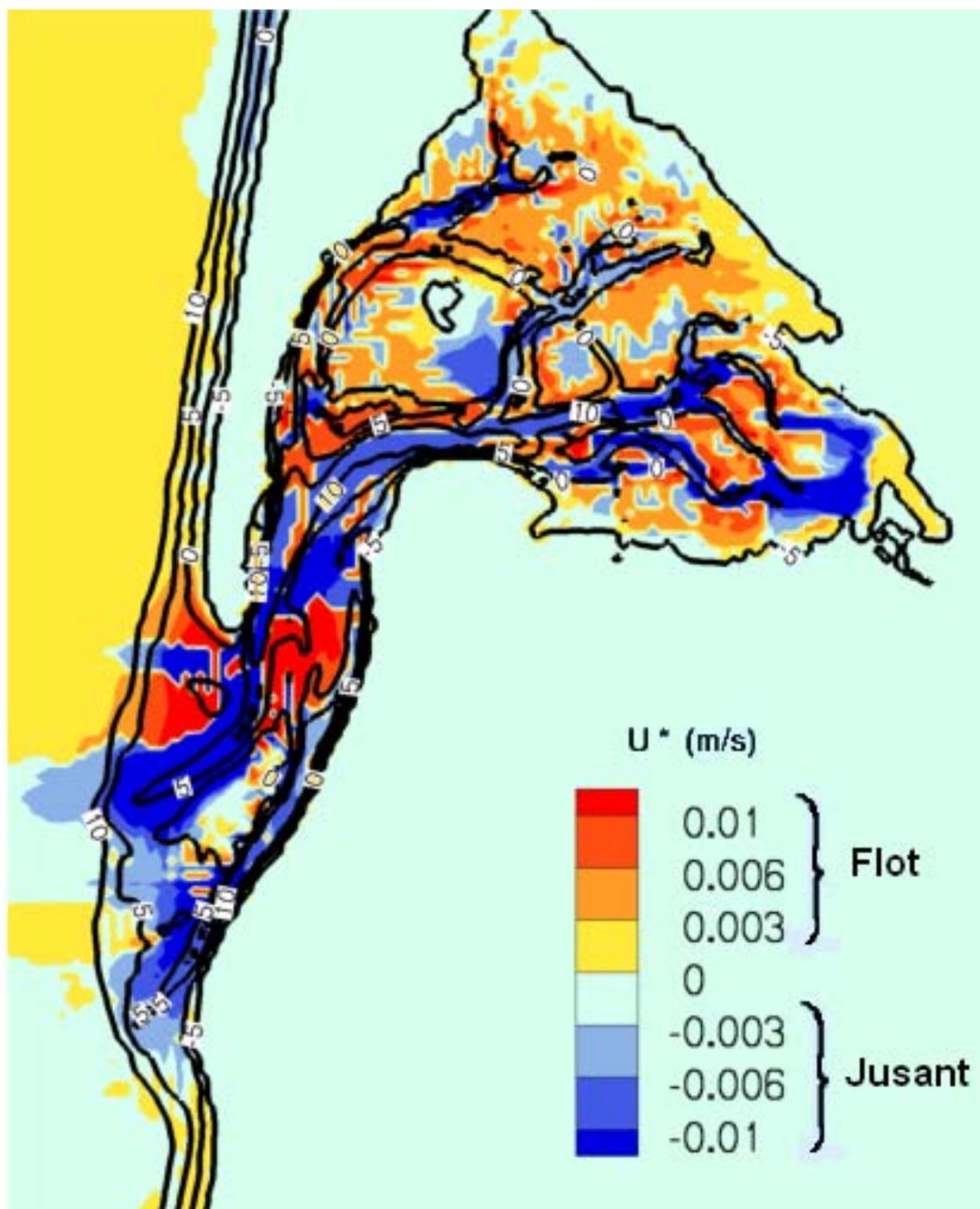


Figure 4.25 : Cartographie du maximum de la vitesse de frottement obtenue au cours d'un cycle de marée de petite vive eau (coef. 70) (b).

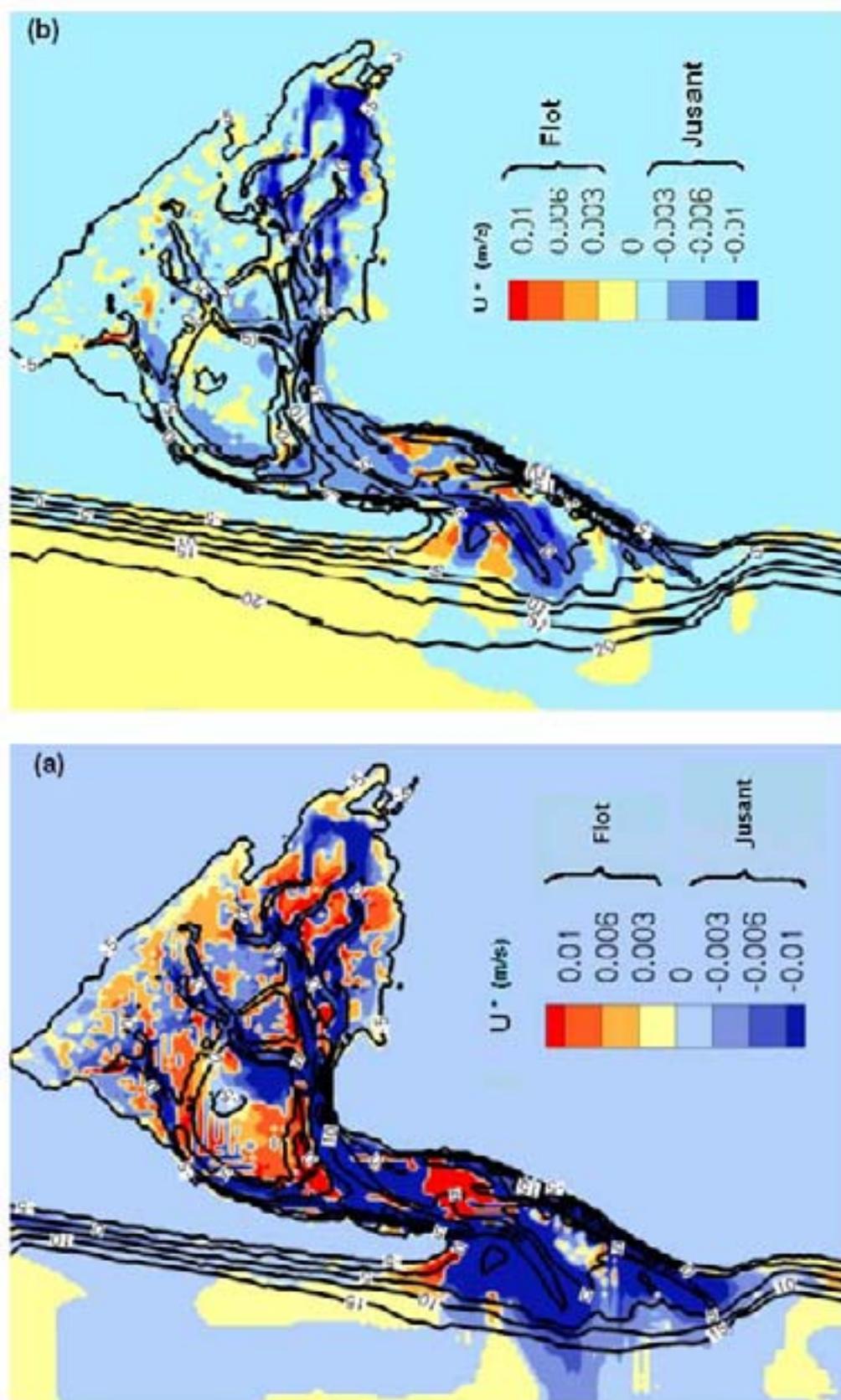


Figure 4.26 : Cartographie du maximum de la vitesse de frottement obtenu au cours d'un cycle de marée de grande vive eau (coef. 100) (a) et de morte eau (coef. 50) (b).

4.5.3 Vitesse résiduelle sur un cycle

La troisième grandeur que nous calculons est la vitesse résiduelle, c'est-à-dire, en chaque point du maillage, la moyenne des vitesses obtenues au cours d'un cycle de marée. Un signe négatif signifie que cette vitesse résiduelle est orientée suivant le jusant, un signe positif signifie qu'elle est orientée suivant le flot.

La vitesse résiduelle indique le sens du déplacement d'une particule qui serait en suspension pendant le cycle de marée.

Elle est cartographiée pour une marée de grande vive eau, une marée de petite vive eau et une marée de morte eau (cf Fig. 4.27, 4.28).

Pour les trois évènements, les vitesses résiduelles des chenaux dans le sud de la lagune et les passes ont une direction de flot. Le nord, les chenaux de liaison et les bancs émergents connaissent des vitesses résiduelles de direction du flot.

Pour les trois coefficients, le contraste nord/sud et zones intertidales/chenaux est très net, les premiers caractérisés par une vitesse résiduelle dirigée suivant le flot, les seconds suivant le jusant.

Pour les trois coefficients, l'opposition nord/sud et zones intertidales/chenaux, les premiers en flot, les seconds en jusant, est très nette.

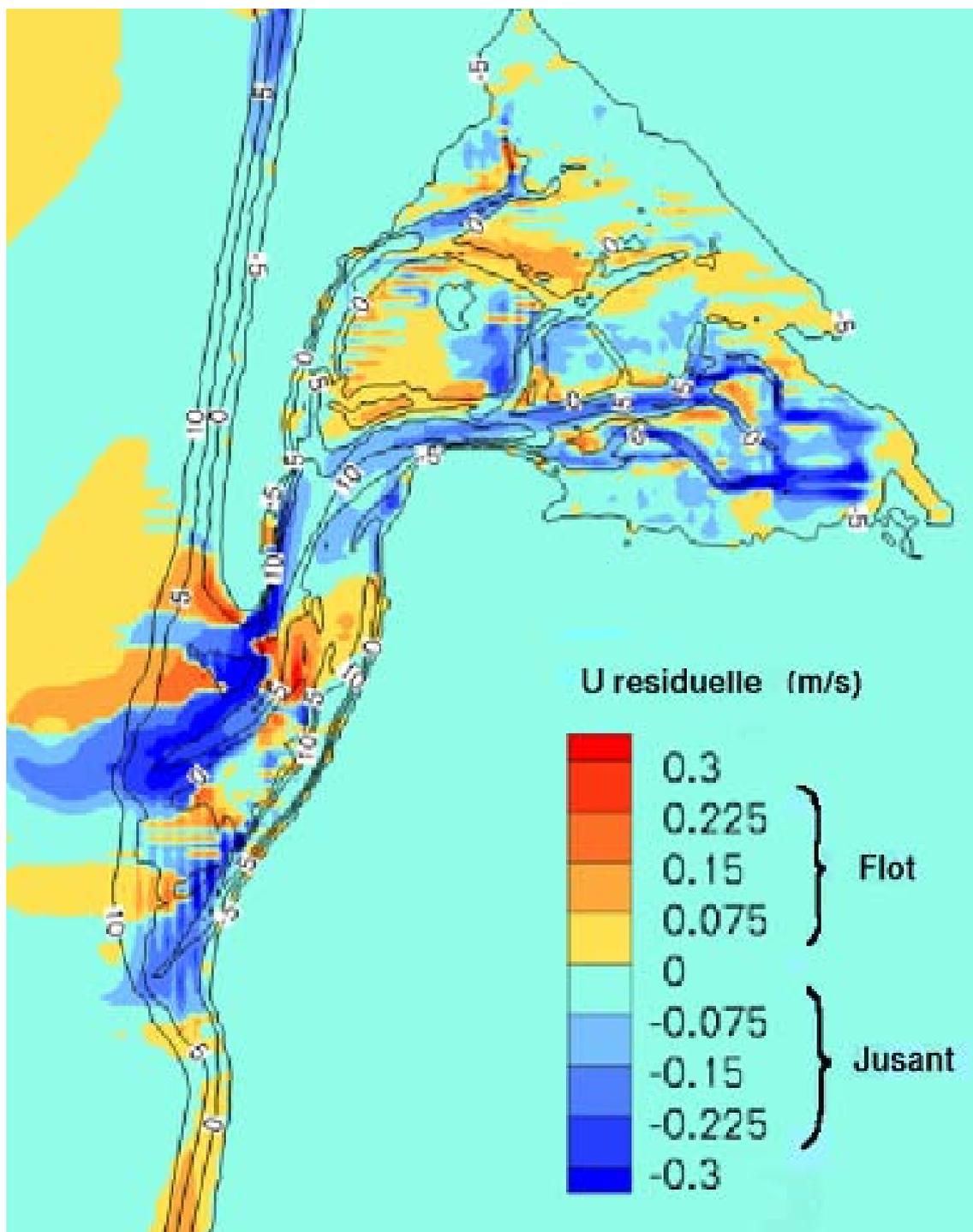


Figure 4.27 : Cartographie de la vitesse résiduelle après un cycle de marée de petite vive eau (coef. 70).

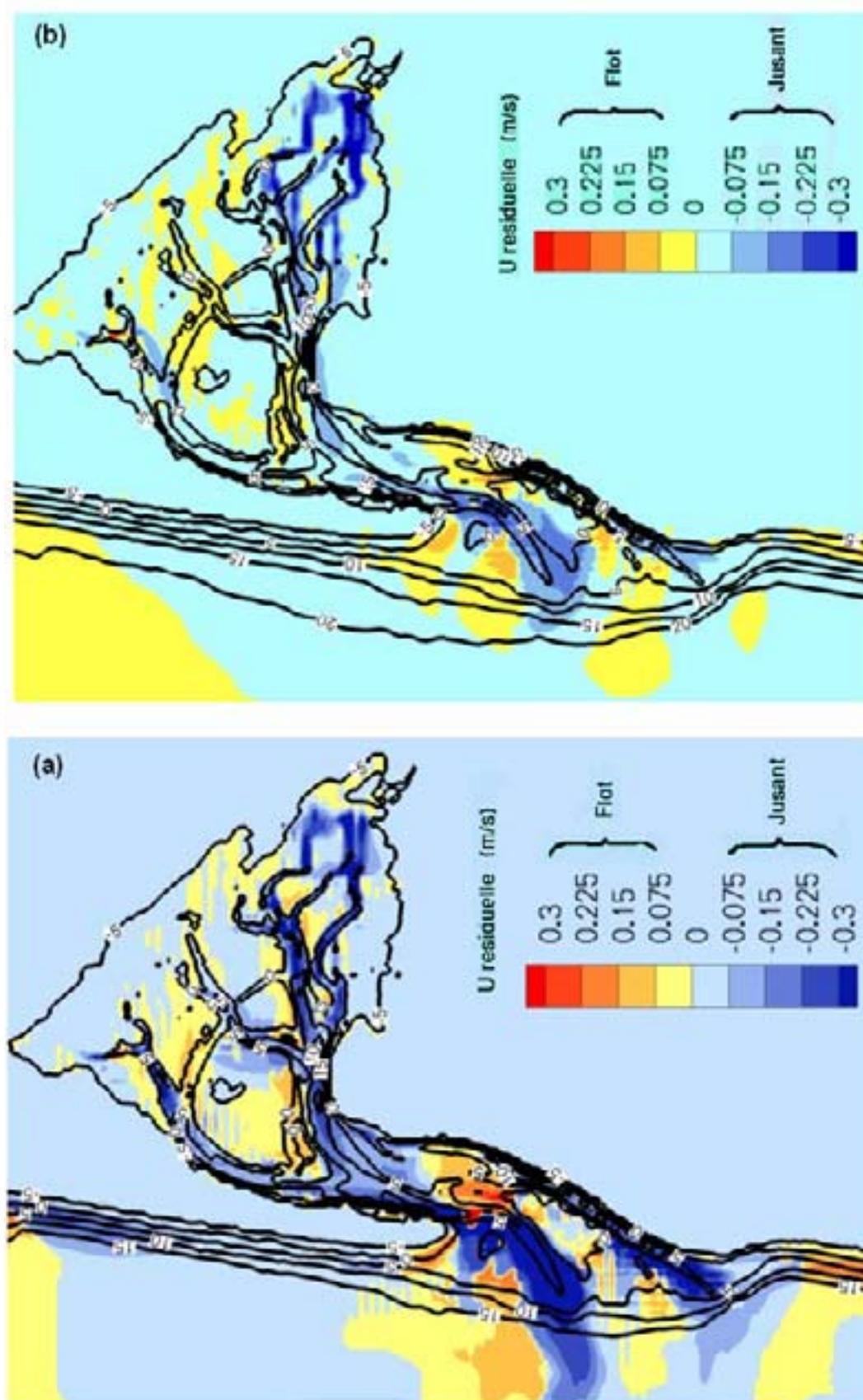


Figure 4.28 : Cartographie de la vitesse résiduelle après un cycle de marée de grande vive eau (coef. 110) (a) et de morte eau (coef. 50) (b).

4.6 Interprétation des cartographies en terme de transport sédimentaire

La lecture en parallèle de ces trois cartographies conduit à la mise en lumière de comportements hydrauliques et de mouvements sédimentaires potentiels au sein de la lagune.

La carte 4.5 extraite des travaux de L'Yavanc est utile pour localiser les lieux dits auxquels le paragraphe qui suit fait référence.

4.6.1 Observation des cartographies

- «– En règle générale, on observe une prédominance du jusant dans les chenaux, et du flot sur les estrans et les zones très peu profondes avoisinants les bancs.

- «– Les intensités des vitesses et des vitesses de frottement sont particulièrement fortes dans le secteur des passes, ce qui confirme les observations *in-situ* de la morphologie active de ce secteur affectée par l'érosion intense.
Il faut cependant rester prudent dans nos assertions générales quant aux tendances morphologiques déduites de nos calculs de l'hydrodynamique, puisque seul un modèle de transport peut confirmer si le faciès sédimentaire permet cette érosion, et si la force hydraulique excède le seuil d'arrachement du sédiment en présence.

- «– Le potentiel d'arrachement est très fort en jusant le long du Cap Ferret, côté lagune, et en flot sur les zones peu profondes, comme les bancs du Toulinguet et du Bernet.

- «– Les faibles courants calculés entre le chenal du Cap Ferret et le chenal du Pyla corroborent les observations de Thauront [Thauront 94] qui notait une faible intensité des vitesses en ce lieu.

- «– La puissance hydraulique dans le sud du bassin est supérieure à celle du nord de la lagune. Le chenal du Piquey, par exemple, connaît des maxima de vitesses moindres que dans la rade d'Eyrac ou le chenal du Teychan.

Par ailleurs nous avons cherché à estimer la partition du débit entrant dans la lagune entre la partie nord et les chenaux du sud.

	Grand coef.		Moyen coef.		Petit coef.	
	Chenal Sud	Chenal Nord	Ch. Sud	Ch. Nord	Ch. Sud	Ch. Nord
Flot	68%	32%	69%	31%	68%	32%
Jusant	75%	25%	74%	26%	77%	23%

Tableau 4.6 : *Partition nord-sud du débit transitant dans la lagune en flot et en jusant, pour trois intensités d'évènements de marée*

Il apparaît (cf Tab.4.6) que 2/3 du prisme de marée transite par les chenaux sud, contre 1/3 pour les chenaux nord.

- «– Au niveau des estrans en fond de lagune, et plus particulièrement au nord - nord est du bassin, la potentialité d'arrachement est prédominante en flot et la vitesse résiduelle est dirigée suivant le flot, ce qui indique une tendance à l'accumulation des sédiments en fond de lagune, hypothèse confortée par la tendance à l'engraissement observée au nord est du bassin.
- «– Les chenaux de liaison (chenal de l'Île, chenal du Courant) paraissent très peu actifs par rapport aux autres chenaux. Ils semblent peu sujets à l'érosion et se distinguent des autres chenaux par une prédominance du flot.
- «– Enfin, on note une intense activité hydraulique au sud ouest du delta de la Leyre - cela en l'absence de débit fluvial entrant- avec une forte prédominance du jusant qui tendrait à chasser les alluvions vers l'ouest. L'Yavanc observe bien, entre 1972 et 1993, une érosion parfois supérieure à 50cm en cet endroit.

Il observe également un engraissement au nord ouest du delta, tendance que manque notre modèle, certainement du fait de la non représentation de la Leyre.

4.6.2 Hypothèses d'évolution future

A partir du traitement de relevés bathymétriques couvrant les périodes 1708 à 1826, 1826 à 1972 et 1972 à 1995, L'Yavanc [L'Yavanc 95] étudie l'évolution bathymétrique du bassin et, en conclusion de son étude, propose un scénario qui prolonge la tendance actuelle et conforte les hypothèses issues de l'observation des cartographies quant aux mouvements sédimentaires à venir.

«– Tout d'abord, L'Yavanc [L'Yavanc 95] prévoit le comblement à terme des chenaux de liaison : le chenal du Courant et le chenal de l'Île. Nous avons vu que notre interprétation des cartographies précédentes allaient également dans ce sens.

«– Ensuite, L'Yavanc annonce l'ouverture d'un nouvel axe hydraulique central d'orientation nord-est qui tend à venir couper la flèche du Cap Ferret, tangenter la partie sud-est de l'Île aux Oiseaux. Il observe un recul important de la flèche vers le nord, dû à l'intensité de la vitesse de frottement à sa base (cf Fig. 4.25). Ce phénomène peut être, toujours selon L'Yavanc, la conséquence du renforcement de cet axe qui génère d'intenses courants de jusant perpendiculaires au Cap Ferret.

Nos cartographies de U_{max} et U^* (cf 4.25) désignent effectivement la pointe de la flèche, côté lagune, comme la région la plus sollicitée, notamment lors du jusant, et la série des champs instantanés Fig.?? (3), (4) et Fig.?? (1), (2) reproduisent l'orthogonalité des vecteurs vitesse par rapport à l'axe de la flèche.

4.6.3 Discussion

Ces trois grandeurs calculées à partir des champs de hauteur et de vitesse instantanés permettent une lecture très graphique du comportement hydraulique et des potentialités de transport dans la lagune. Les interprétations des cartographies réalisées rejoignent les observations faites in-situ et consignées dans la littérature.

Nous insistons cependant sur le caractère hypothétique de ces interprétations de l'hydrodynamique du bassin en terme de transport sédimentaire et de morphodynamique.

Seul un modèle de transport couplé au module hydrodynamique permettra de valider ces thèses.

4.7 Exemple d'application du code à l'étude d'une situation concrète

Nous avons construit notre modèle du bassin d'Arcachon dans un cadre universitaire, dans le but de reproduire au plus près et d'explorer les processus hydrodynamiques dont une baie tidale très peu profonde peut être le siège. Son développement, permanent, doit pouvoir contribuer à accroître les connaissances des phénomènes physiques aussi bien qu'au perfectionnement numérique pour leur simulation.

Un tel code peut aussi connaître une utilisation dans le secteur de l'ingénierie maritime et côtière. Il devient alors un outil "figé" pour la réalisation d'études d'ingénierie, par exemple en vue de modifications à apporter au littoral, pour prévenir leurs impacts sur l'environnement, pour comparer par simulation des solutions d'aménagement et leurs évolutions sur le long terme afin d'aider au choix définitif, etc.

Ici nous proposons, par une brève mise en situation, un exemple d'utilisation du modèle dans le cadre de l'ingénierie.

4.7.1 Situation du problème

La pointe du Cap Ferret connaît actuellement une érosion importante, notamment dans la région repérée par le rectangle vert (Fig. 4.31 (a)). Effectivement, en cette zone, le frottement est particulièrement fort au cours du jusant (voir Fig. 4.25) comme on l'a remarqué précédemment.

Ce phénomène inquiète la population locale, en quête d'une solution à cette situation qui menace les occupants de la zone considérée. Des projets sont menés, d'instigateurs divers, qui cherchent à protéger la flèche de l'érosion.

Une solution serait de dévier vers le sud le courant de jusant orthogonal à la flèche pour atténuer l'impact de l'écoulement. Mais cela nécessite la construction d'un déflecteur entre Bélisaire et Arcachon, déposé sur le fond du chenal. Or les conséquences d'un tel ouvrage sur le transit sédimentaire sont redoutables, empêchant son cours naturel et engendrant des phénomènes d'engraissement et d'affouillement de part et d'autre de l'obstacle.

Une autre proposition consiste à élargir la section de passage des courants de jusant dans le chenal du Ferret (cf 4.5) en rabotant le côté du banc du Bernet qui fait face à la

flèche. En augmentant la section, on souhaite diminuer l'intensité du courant impactant.

Enfin, on peut chercher à protéger la flèche de l'érosion en diminuant localement la rugosité du fond.

4.7.2 Scénarii d'aménagement

Afin d'évaluer la pertinence de ces propositions, nous menons des simulations de l'hydrodynamique du bassin d'Arcachon pour trois scénarii différents. On propose de comparer les simulations menées sur les trois configurations suivantes :

- «- la configuration actuelle,
- «- la configuration obtenue après avoir raboter le banc du Bernet en prélevant près de 9 millions de m^3 de sable sur le flan du banc qui fait face à la flèche, entre les isobathes -5 et -2 .
- «- la configuration obtenue après diminution numérique de la longueur de rugosité z_0 .

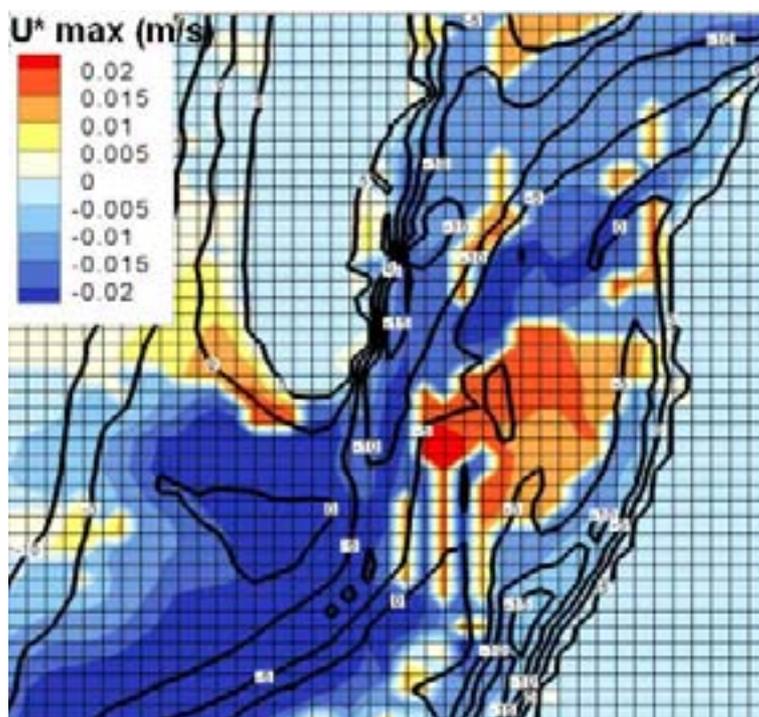


Figure 4.29 : Zoom sur la pointe du Cap Ferret, visualisation de la discrétisation spatiale

A défaut d'un modèle topographique plus détaillé que la précédente bathymétrie, discrétisée par des mailles de $200\text{m} \times 200\text{m}$, les simulations se font sur le même maillage que précédemment 4.29, puis l'on effectue un zoom sur les résultats obtenus dans le voisinage de la pointe du Cap Ferret.

On visualise $\tau = \rho(U^*)^2$ la contrainte sur le fond. Les résultats pour la première situation (cf Fig. 4.30 (a)), actuelle, servent de référence, à comparer avec ceux obtenus pour les deux scénarii testés (cf Fig. 4.31 (a) et (b)).

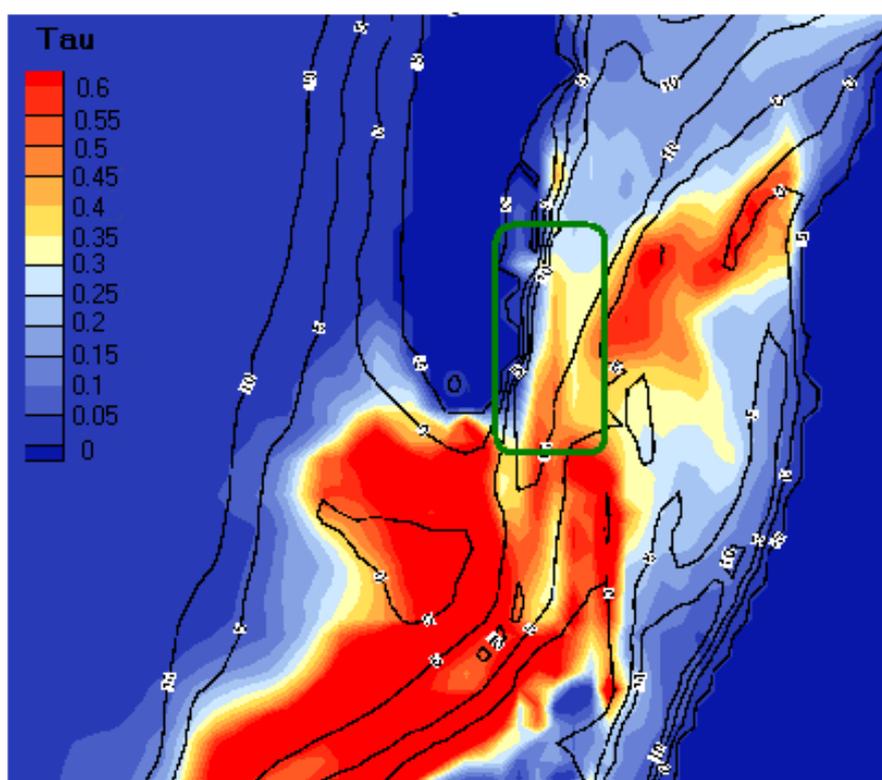
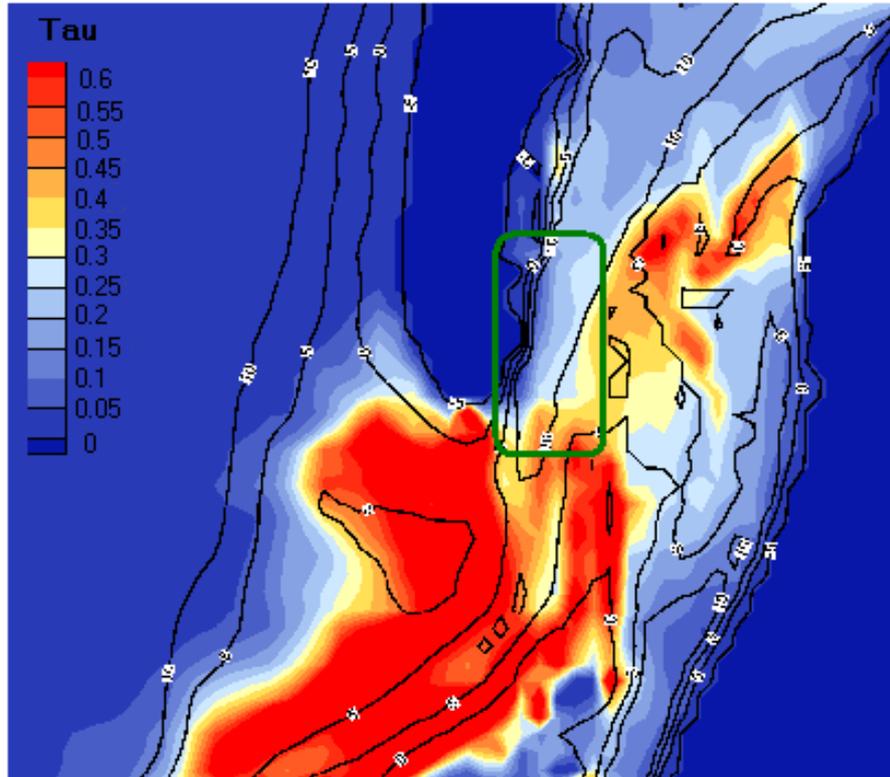
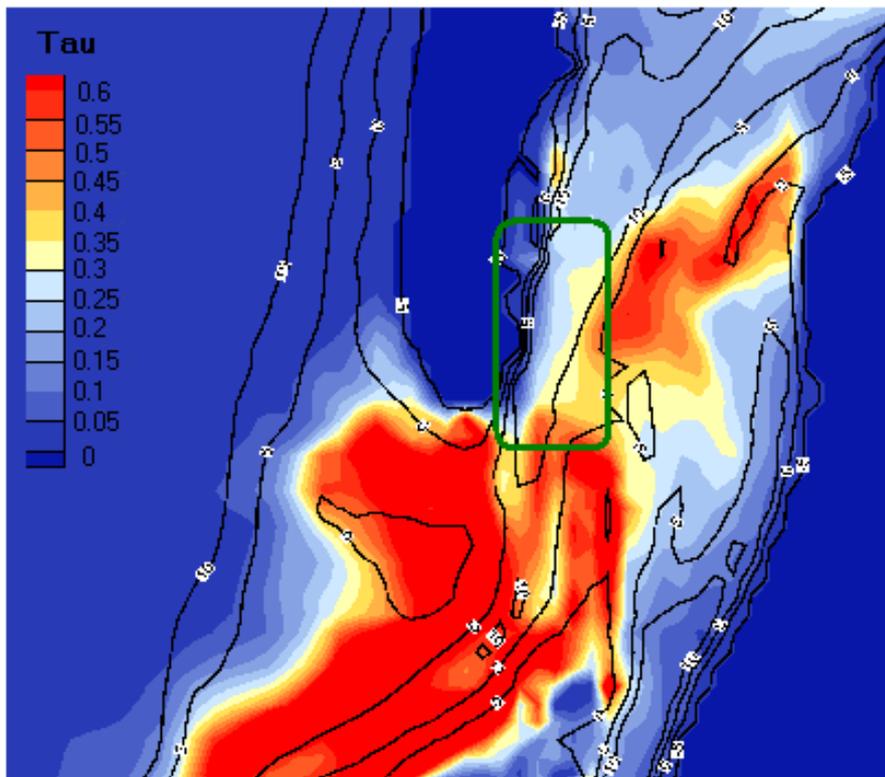


Figure 4.30 : *Contrainte de frottement autour de la pointe du Cap Ferret: situation actuelle.*



(a)



(b)

Figure 4.31 : *Contrainte de frottement autour de la pointe du Cap Ferret: (a) après rabotage du banc du Bernet; (b) après une diminution de la rugosité.*

4.7.3 Discussion

Le rectangle vert, présent sur les trois cartographies (Fig. 4.30, 4.31(a),(b)), encadre la région ciblée par les aménagements.

On note, dans ce cadre, une baisse conséquente de la contrainte à la base de la flèche sableuse après élargissement du chenal, de même qu'après diminution de la rugosité de peau.

Raboter le banc du Bernet, par un prélèvement de 9M de m^3 de sable côté chenal, s'avère cependant le plus efficace des scénarii. D'autres volumes ont été testés, plus importants, pour des résultats encore plus probants. Mais draguer et acheminer le sable pour le relarguer plus loin est une opération très coûteuse, et dans l'optique du bureau d'étude, un compromis doit être trouvé pour un résultat satisfaisant au coût le plus réduit possible.

Cependant avant de proposer une telle solution, il est nécessaire de pouvoir évaluer les remaniements sédimentaires qui suivent le dragage. Il est probable que le nouveau système hydrosédimentaire cherche à revenir à la situation de pseudo-équilibre d'avant l'intervention de l'homme. On doit donc s'assurer que l'opération n'aura pas à être répétée fréquemment du fait de mouvements sédimentaires tendant à combler la région draguée. Seul un modèle de transport permettra de quantifier le transport initié par le dragage et d'apprécier la tendance et la rapidité de l'évolution morphodynamique de la zone modifiée.

4.8 Conclusion

Ainsi, l'application de notre modèle pour la simulation de l'hydrodynamique des baies tidales très peu profondes au bassin d'Arcachon nous permet, en premier lieu, de valider ce modèle sur un cas réel complexe. Comme on l'a vu dans cette partie, sur une bathymétrie aussi irrégulière que celle du bassin d'Arcachon, il se montre robuste, offre la possibilité d'utiliser de grands pas de temps et présente un traitement des larges zones intertidales satisfaisant.

Une description topographique plus fine des estrans nous manque pour tester plus avant les avantages de notre traitement du phénomène d'immersion/émergence, ce qu'il reste à faire dès que le modèle de terrain pourra être raffiné.

Dans un deuxième temps, après la validation du modèle et de l'hydrodynamique simulée, nous entreprenons l'analyse et l'exploitation des champs instantanés pour extraire des tendances caractéristiques du comportement hydraulique de la lagune et pour émettre des hypothèses quant aux évolutions morphodynamiques, uniquement à partir de l'interprétation de l'hydrodynamique actuelle ou modifiée par un aménagement.

Cependant, nous avons conscience que ces hypothèses n'ont de valeur que si elles sont validées par les résultats d'un modèle de transport sédimentaire couplé au module pour l'hydrodynamique.

Conclusion Générale et Perspectives

La zone littorale est le siège d'une grande variété de phénomènes hydrodynamiques et sédimentaires.

Un des objets de la thèse était de développer un outil numérique pour la simulation des écoulements tidaux en milieux très peu profonds, adaptés à l'étude des baies côtières. Ces lagunes, protégées de la houle par un système de flèche et de passes plus ou moins formé, présentent des étendues intertidales considérables, alternativement couvertes et découvertes par l'oscillation du plan d'eau au cours de la marée. Leurs bathymétries, faites de réseaux de chenaux creusant les estrans, peuvent se révéler complexes et fortement irrégulières.

Nous avons cherché à construire un code tout à la fois robuste, précis et efficient, associant de manière originale des modèles et des méthodes numériques disponibles dans la bibliothèque numérique du code de calcul AQUILON, dans le but de satisfaire au mieux aux exigences fortes suivantes : résoudre les équations en eaux peu profondes, hyperboliques, tout en permettant l'utilisation de grands pas de temps, la gestion de topographies irrégulières et le traitement des larges zones intertidales.

Dans le modèle proposé pour ce faire, les équations de l'écoulement sont résolues implicitement et discrétisées spatialement sur une grille cartésienne décalée en vitesse/pression de type MAC. Une méthode robuste, directement inspirée de l'algorithme du "Lagrangien augmenté" et adaptée aux écoulements compressibles, est utilisée pour coupler la masse volumique et la quantité de mouvement. Enfin, la caractérisation des zones sèches est assurée par une méthode de pénalisation tandis que l'évolution de l'interface eau/banc découvrant est obtenue au moyen d'une fonction de phase que l'on peut soit advecter, soit traiter directement par un calcul explicite.

L'outil numérique pour la modélisation de l'hydrodynamique côtière ainsi réalisé a, dans un premier temps, été validé sur des cas tests académiques. La comparaison des résultats issus de nos simulations avec ceux de la littérature a confirmé sa stabilité, sa capacité à prendre en compte des bathymétries irrégulières et à traiter les phénomènes d'immersion/émergence de façon satisfaisante, tout en utilisant de grands pas de temps.

Puis, dans un deuxième temps, nous avons appliqué notre code à l'étude d'un site côtier réel, de bathymétrie complexe : le Bassin d'Arcachon. L'ajustement des champs de hauteurs et vitesses à partir des résultats issus du code Mars d'IFREMER a montré d'une part la validité de notre modèle qui réussit à simuler, sans artifice numérique, la propagation d'une dizaine de marées consécutives dans une lagune à la topographie aussi complexe que celle du Bassin. C'est une seconde validation, sur cas réel, du modèle physique proposé, des schémas de discrétisation choisis et des méthodes de résolution numériques utilisées.

D'autre part, le calage de l'hydrodynamique nous a permis de proposer une description plus physique du comportement hydraulique de la lagune à partir de grandeurs caractéristiques, et d'émettre des hypothèses quant aux mouvements sédimentaires et aux évolutions morphodynamiques susceptibles d'être générés dans une telle configuration hydrodynamique.

Ainsi, par ce travail de thèse effectué sous la co-tutelle de deux laboratoires aux spécialités différentes - pour l'un les méthodes numériques pour les écoulements, pour l'autre l'océanographie - nous avons tenté de relier les deux disciplines.

Le module de calcul des écoulements côtiers développé dans le but d'une implémentation dans le code AQUILON, devient outil pour l'étude géophysique d'une baie réelle complexe qu'est le bassin d'Arcachon.

Perspectives

Ces deux aspects de la thèse impliquent des perspectives dans les deux domaines.

Couplage hydro-transport et morphodynamique des zones intertidales du bassin

Tout d'abord, l'implémentation dans AQUILON d'un module de transport sédimentaire et de morphodynamique nous apparaît être l'étape suivante de ce travail. Le couplage de l'hydrodynamique avec une équation type Bailard a été réalisé mais non encore validé.

Pour l'étude du bassin d'Arcachon, la simulation du transport sera une vérification des hypothèses d'évolution bathymétrique de la lagune.

En effet, comme nous l'avons évoqué au chapitre précédent, les champs hydrodynamiques sont nécessaires mais ne suffisent pas pour apprécier les volumes solides transportés. Un calcul effectif du transport introduit la prise en compte de la taille du grain, de la valeur seuil d'arrachement, la masse volumique du matériau, afin d'évaluer les débits charriés ou remis en suspension par les courants calculés.

La morphodynamique de la lagune dans son ensemble n'a jamais été modélisée. La morphologie très active des passes a été abordée, étudiée numériquement par Cayocca [Cayocca 96] notamment. On connaît relativement bien leur fonctionnement, le cycle de 80 ans d'un chenal: il s'ouvre au nord, migre vers le sud, coexiste un temps avec un nouveau chenal créé au nord lors de sa migration, puis disparaît ().

Mais celle du fond du bassin est beaucoup plus lente et l'engraissement observé des platiers est complexe à reproduire du fait des nombreux facteurs intervenant dans la sédimentation [Hir 00] dont on ne maîtrise pas encore les parts d'implication.

Etude d'un système chenal-platier

Effectuer un zoom sur une région du bassin limitée à un système chenal-platier de quelques centaines de mètres de côté, maillé finement, nous semble une suite pertinente à ce travail.

Pour la recherche géophysique en milieux côtiers, développer la modélisation du trans-

port sédimentaire en zone intertidale répond à une demande face à l'état de l'art actuel. Chercher, pour le bassin, la paramétrisation numérique adéquate pour la prise en compte de la végétation (zostères) est une gageure dont la portée dépasse largement l'intérêt régional.

D'un point de vue numérique, ce zoom serait un moyen de tester véritablement les atouts de notre traitement des zones intertidales associé aux méthodes de résolution choisies. En effet, si la comparaison du modèle avec des schémas ADI sur des cas tests théoriques (cf Balzano) semble aller dans ce sens, la simulation de l'hydrodynamique du bassin d'Arcachon n'a pas permis de le vérifier. Le maillage utilisé, trop lâche, introduit d'autres sources de divergence par rapport aux résultats existants, ce qui nous empêche, en l'état, de conclure quant aux avantages du traitement à partir de son comportement sur un site réel.

Développements numériques pour le traitement des zones intertidales

Enfin, pour réduire l'impact des modifications de la ligne d'eau au niveau de l'interface zone immergée/zone sèche, nous souhaitons utiliser une technique de raffinement de maillage appliquée à cette région mobile dans le temps. L'AMR, récemment mise au point dans AQUILON, est désormais disponible pour un tel usage. Elle permettrait d'intervenir sur les niveaux d'eau de mailles très fines, et ainsi de modifier moindrement le volume global lors de la simulation.

Afin de réduire le maillage et le temps de calcul, on cherchera à intégrer le maillage multibloc, fixe dans le temps, pour décrire précisément les zones de fortes irrégularités topographiques tout en gardant un maillage plus lâche dans les régions de faibles pentes. On n'oublie pas que des améliorations seront à apporter à notre traitement actuel des conditions limites.

Il serait intéressant également de donner à la perméabilité une signification plus physique, en ajoutant une loi de progression de la vitesse en fonction de K au niveau de l'interface, et s'approcher ainsi des phénomènes de drainage des bancs intertidaux.

Glossaire

Les définitions proviennent du dictionnaire hydrographique de l'OHI (Organisation hydrographique internationale), le site du Service Hydrographique du Canada, et du site du SHOM (Service Hydrographique et Océanographique de la Marine).

Analyse harmonique de la marée :

La marée prédite présentée dans les annuaires de marée et sur l'application de prédiction disponible sur ce serveur, est calculée grâce à la somme instantanée de 143 ondes élémentaires. Toutefois, on ne tient compte en réalité que des composantes ayant plus d'un millimètre d'amplitude. Les autres termes sont négligés. Ainsi, à Brest, seules 105 des 143 composantes harmoniques répondent à cette condition.

Ondes composant la marée

La marée peut être considérée comme la somme de marées élémentaires strictement périodiques appelées composantes harmoniques.

La courbe de marée d'une onde composante est une sinusoïde dont l'amplitude et la phase ne dépendent que du lieu d'observation. Ainsi la hauteur de la marée à un instant t peut s'exprimer par la formule suivante :

$$h(t) = Z_0 + (A_i \cos(q_i t + V_{oi} - G_i))$$

Z_0 est le niveau moyen, rapporté au zéro des cartes, autour duquel oscille le niveau de l'eau. A_i et G_i , appelés constantes harmoniques, sont respectivement l'amplitude et la situation à Greenwich de l'onde élémentaire et ne dépendent que du port considéré ; q_i est la vitesse angulaire de l'onde élémentaire V_{oi} est la valeur de l'argument astronomique pour $t = 0$

On répartit les composantes harmoniques en quatre grands groupes :

«- les ondes semi-diurnes dont la période est voisine de douze heures ;

«– les ondes diurnes dont la période est voisine de 24 heures ;

«– les ondes de longues périodes : bimensuelle, mensuelle, semestrielle, annuelle...

«– les ondes supérieures et composées de périodes quart-diurne, tiers-diurne...

Les ondes diurnes et semi-diurnes sont généralement les plus importantes. Elles génèrent la forme générale de la marée en un lieu et déterminent le type de la marée. Toutefois, dans les zones de faible profondeur, les ondes supérieures et composées peuvent devenir très importantes.

Les ondes composantes à longues périodes ont des amplitudes faibles et peuvent être considérées comme des variations du niveau moyen.

L'ensemble de ces ondes, chacune par sa période, son amplitude et sa phase constitue le spectre de la marée qui forme la carte d'identité de la marée dans le port désigné. Chaque port a un spectre de marée caractéristique. Pour les sites où la marée est importante, la prise en compte de plus d'une centaine d'ondes composantes peut être nécessaire pour un calcul précis.

Ce spectre est déterminé en analysant les observations réalisées pendant une longue période (au minimum 29 jours, correspondant à une lunaison, mais de préférence, plus d'une année pour obtenir une bonne précision). La connaissance de ce spectre permet de prédire la marée astronomique.

Les composantes les plus importantes sont les suivantes :

«– composantes semi-diurnes :

l'onde M2 est la marée générée par la "Lune moyenne", astre fictif animé d'un mouvement uniforme sur une orbite circulaire située dans le plan de l'équateur et ayant la même période de révolution que la Lune réelle. Cette marée présente deux pleines mers et deux basses mers par jour lunaire (24 h 50 min) ; l'onde S2 représente la marée due au "Soleil moyen", astre fictif animé d'un mouvement uniforme, sur une orbite circulaire située dans le plan de l'équateur et ayant même période de révolution que le Soleil réel. Elle représente deux pleines mers et deux basses mers par jour solaire (24 h).

«– composantes diurnes :

l'onde K1 a pour origine les variations de déclinaison de la Lune et du Soleil. Elle

est marquée par une pleine mer et une basse mer par jour sidéral (23h56min); l'onde O1 est induite par les variations de déclinaison de la Lune. Elle présente une pleine mer et une basse mer par jour lunaire.

Âge de la marée :

Retard entre le maximum d'amplitude de la marée et le maximum d'action des astres. Pour une marée de type semi-diurne, c'est l'intervalle de temps qui sépare une pleine lune ou une nouvelle lune de la vive-eau qui suit. Pour une marée de type diurne, c'est l'intervalle de temps qui sépare le passage de la Lune à ses tropiques de l'instant de la vive-eau qui suit. A Brest, par exemple, l'âge de la marée pour la composante semi-diurne est approximativement de 36 heures alors qu'il est de 4 jours et demi pour la composante diurne.

Amphidromique (Point) :

Un point amphidromique est le lieu où l'amplitude d'une onde de marée (définie par une période précise) est nulle. L'onde de marée tourne autour de ce point.

Amplitude :

Différence entre la hauteur d'une pleine mer ou d'une basse mer et le niveau moyen. Ce terme est souvent utilisé à tort pour désigner le marnage. Basse mer (abréviation BM) : niveau le plus bas atteint par la mer au cours d'un cycle de marée.

Bore :

Onde solitaire, mascaret.

Clapot :

Agitation désordonnée et localisée de la surface de la mer, générée par le vent.

Coefficient de la marée (abréviation C):

Quotient du demi-marnage dû aux composantes semi-diurnes par l'unité de hauteur. Il est exprimé en centièmes. Les valeurs des coefficients correspondant aux pleines mers de

Brest sont publiés dans l'Annuaire des marées des ports de France. (*voir aussi fig. 7.1*)

Etat de la mer	Coefficient de la marée (C)
Vives eaux les plus fortes	120
VE d'équinoxe moyenne	100
VE moyenne	94
Marée moyenne	70
Mortes eaux moyennes	45

Tableau 4.7 : *Listes des séquences simulées, coefficients de marée et stations de comparaison.*

Courant :

déplacement horizontal de particules d'eau de mer, caractérisé par une direction et une vitesse.

Courant alternatif :

Courant de marée portant alternativement dans deux directions à peu près opposées, avec une étale de courant à chaque renverse. De tels courants se produisent principalement dans les zones où les mouvements d'eau se concentrent dans des chenaux relativement étroits.

Courant de flot :

Mouvement horizontal de l'eau correspondant, avec un décalage plus ou moins important, à la marée montante. Les courants de flot portent généralement, selon le cas, vers la côte ou dans la direction de propagation de l'onde marée. On dit aussi flot.

Courant de jusant :

Mouvement horizontal de l'eau correspondant, avec un décalage plus ou moins important, à la marée descendante. Les courants de jusant portent généralement, selon le cas, vers le large ou dans la direction opposée à celle de la propagation de l'onde marée. On dit aussi jusant, ou courant de reflux.

Courantomètre :

Appareil destiné à mesurer soit seulement la vitesse, soit à la fois la vitesse et la direction du courant. Il peut mesurer le courant en surface ou en profondeur. Il peut être mécanique, électromécanique, électronique ou acoustique. Il peut comporter un enregistrement interne ou une transmission radio.

Courbe de marée :

Graphique représentant les variations du niveau de la mer en fonction du temps en un lieu donné. Pour une marée normale, la courbe ainsi tracée a approximativement la forme d'une sinusoïde. Voir aussi marégramme.

Delta :

Dépôt alluvionnaire en forme d'éventail à l'embouchure d'un cours d'eau - ou d'un chenal -, formé par le dépôt de couches successives de sédiments.

Dragage :

Extraction de la vase du fond d'un plan d'eau, à l'aide de machinerie spéciale. Le dragage perturbe l'écosystème et cause un ensablement qui peut s'avérer fatal pour la vie aquatique.

Engraissement :

Élévation par sédimentation du profil transversal d'une plage, d'un cordon littoral ou d'un lobe de méandre.

Érosion :

Usure ou lessivage du sol et de la surface de la terre par l'action de l'eau, du vent ou de la glace.

Estran :

Bande côtière comprise entre les niveaux atteints par les plus hautes mers et les plus basses mers, alternativement émergée et submergée, il est limité par la laisse de pleine mer et la laisse de basse mer.

Estuaire :

Région d'interaction entre un cours d'eau et les eaux océaniques côtières, où l'action tidale et l'écoulement fluvial ont pour effet de mélanger les eaux douces et les eaux salées. On peut y trouver des baies, des embouchures, des marais salés et des lagunes. Ces écosystèmes aux eaux saumâtres offrent abri et nourriture à la faune marine, terrestre et avienne.

Étale :

Intervalle de temps pendant lequel le niveau de la mer reste sensiblement stationnaire, on parle, selon le cas, d'étale de basse mer et d'étale de pleine mer.

Inlet :

Goulet d'étranglement entre la lune et la mer.
Anse, Crique.

Isobathe :

Ligne imaginaire reliant les points du domaine océanique de même profondeur d'eau.

Laisse :

Trace au sol laissée par la PM ou la BM.

Lagune :

Plan d'eau peu profond, souvent séparé de la mer par des récifs de corail ou des bancs de sable.

Marée :

Mouvement à allure périodique du niveau de la mer, dû aux effets sur les particules liquides de l'attraction gravitationnelle exercée par la Lune et le Soleil.

Marégramme :

Graphique représentant les variations du niveau de la mer, en un lieu, en fonction du temps.

Marégraphe :

Instrument d'enregistrement automatique de la marée; il enregistre des variations de hauteurs d'eau.

Marnage :

Différence de hauteur entre une basse mer et une pleine mer successives.

Le marnage varie selon la période de vive-eau, moment où il est plus fort et la période de morte-eau où, a contrario, il est plus faible. Les marnages peuvent être très différents d'une zone à l'autre. Le marnage maximal observé dans le monde est dans la baie de Fundy, au Canada entre la Nouvelle-Écosse et le Nouveau-Brunswick. Le marnage peut y atteindre jusqu'à 16m. En France, dans la baie du Mont-Saint-Michel, le marnage peut atteindre jusqu'à 13m par forts coefficients.

Modèle :

Simulation, par moyens descriptifs, statistiques ou autres, d'un processus ou d'un projet qu'il est difficile ou impossible d'observer directement.

Montant :

Intervalle de temps entre la basse mer et la pleine mer qui la suit. Synonymes: marée montante, montée, flux.

Morte-eau :

Période pendant laquelle le marnage passe par un minimum.

Morte-eau moyenne (abréviation : ME)

Morte eau de coefficient 45, qui correspond à la moyenne des mortes-eaux.

Niveau moyen :

Niveau résultant d'une opération (filtrage) consistant à éliminer les composantes périodiques (marée) de la hauteur d'eau observée. Les niveaux moyens journaliers, mensuels, annuels, etc sont obtenus en effectuant la moyenne de cette quantité.

Niveau de mi-marée :

Moyenne des hauteurs de pleine mer et de basse mer.

Observatoire de marée :

Site d'observation de la marée incluant l'appareil enregistreur appelé marégraphe, l'échelle

de marée et les repères de nivellement placés à proximité.

Pleine mer (abréviation: PM) :

Niveau le plus élevé atteint par la mer au cours d'un cycle de marée.

Perdant :

Intervalle de temps entre une pleine mer et la basse mer qui la suit. Synonymes: marée descendante, baissée, reflux.

Quadrature :

Position de la Lune et du Soleil quand leurs directions par rapport à la Terre forment un angle droit (terme général pour Premier Quartier et Dernier Quartier).

Revif :

Période comprise entre une morte-eau et une vive-eau pendant laquelle l'amplitude de la marée augmente.

Sédimentation :

Dépôt de sédiments en suspension dans l'eau ou dans l'air.
ensemble de processus d'accumulation de dépôts solides sur les fonds marins.

Sédiments :

Fragments de matière organique ou inorganique produits par l'altération de matériaux du sol, alluviaux et rocheux; ces matières sont enlevées par l'érosion et transportées par l'eau, le vent, la glace et la gravité.

Seiche :

Petite oscillation de courte période du niveau de l'eau qui se superpose à la marée, souvent rencontrée dans les rades et les ports.

Syzygie :

Position qu'occupe la Lune en conjonction ou en opposition avec le Soleil (terme général pour Nouvelle Lune et Pleine Lune).

Turbidité:

Opacification causée par la présence de matières solides en suspension dans l'eau; indicateur de la qualité de l'eau.

Type de marée:

Classification de la marée selon l'importance relative des composantes diurnes et semi-diurnes.

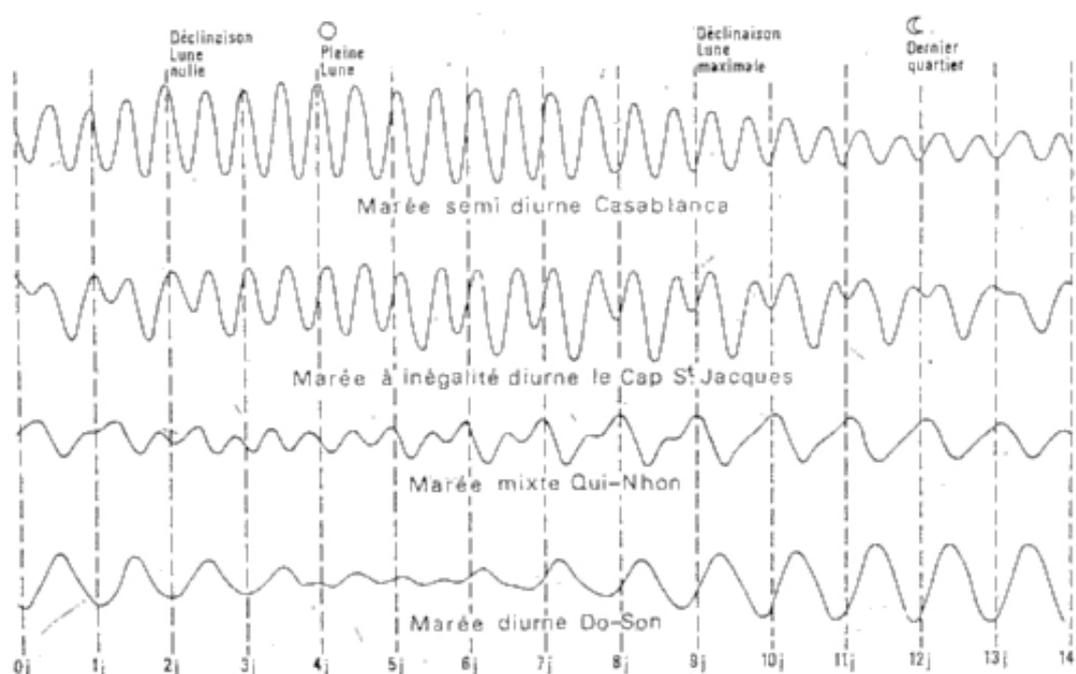


Figure 4.32 : *Marégramme explicatif des notions techniques.*

Vive-eau :

Période pendant laquelle le marnage passe par un maximum.

Vive-eau moyenne (abréviation VE) :

Vive-eau de coefficient 95, qui correspond à la moyenne des vives-eaux.

Zéro hydrographique ou zéro des cartes :

Niveau de référence à partir duquel sont comptées positivement vers le nadir les sondes portées sur les cartes marines et positivement vers le zénith les hauteurs de marée. En France, le zéro hydrographique est théoriquement le niveau de basse mer astronomique extrême (en anglais L.A.T ou Lower Astronomical Tide). Si la définition de cette règle est actuellement pleinement satisfaisante, son application se heurte à des difficultés pratiques, particulièrement sur les côtes françaises où elle a été adoptée très tôt. Les zéros hydrographiques des ports français ont été généralement choisis indépendamment les uns des autres, à une époque où les moyens techniques ne permettaient pas une détermination précise du niveau des plus basses mers. On dit alors que les sondes sont rapportées approximativement au niveau des plus basses mers.

Zone intertidale :

Voir *Estran*.

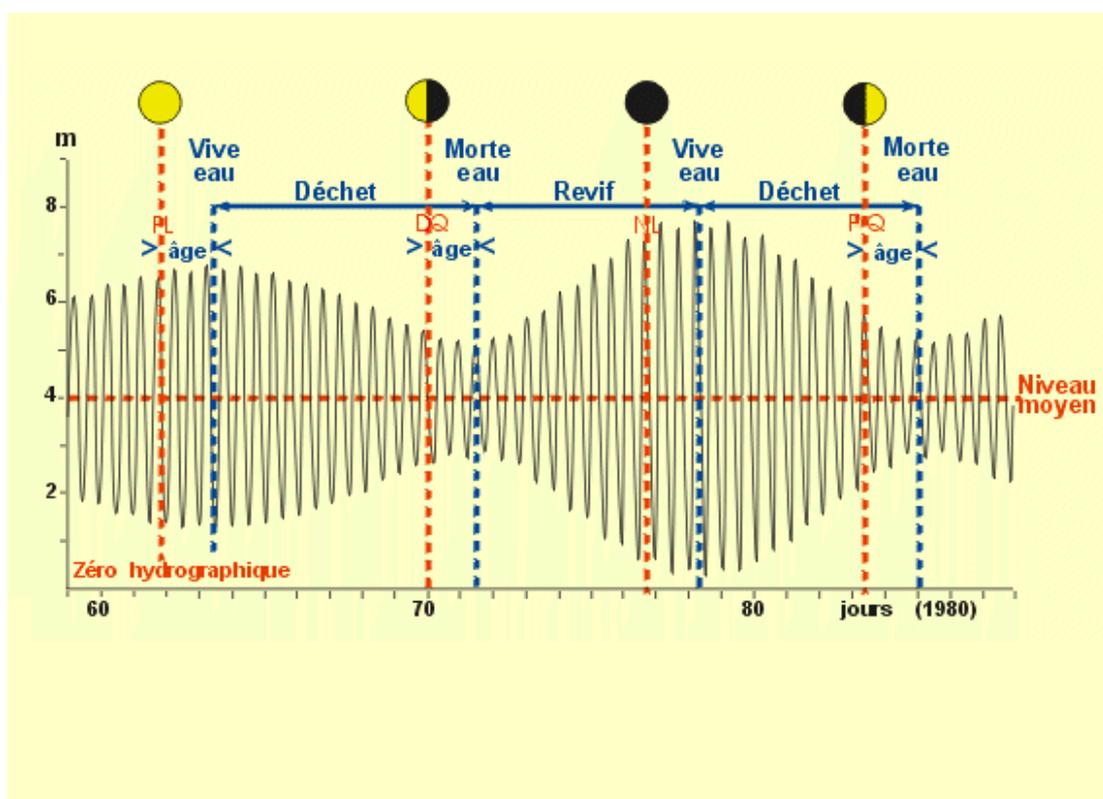


Figure 4.33 : *Marégramme explicatif des notions techniques.*

Annexe A

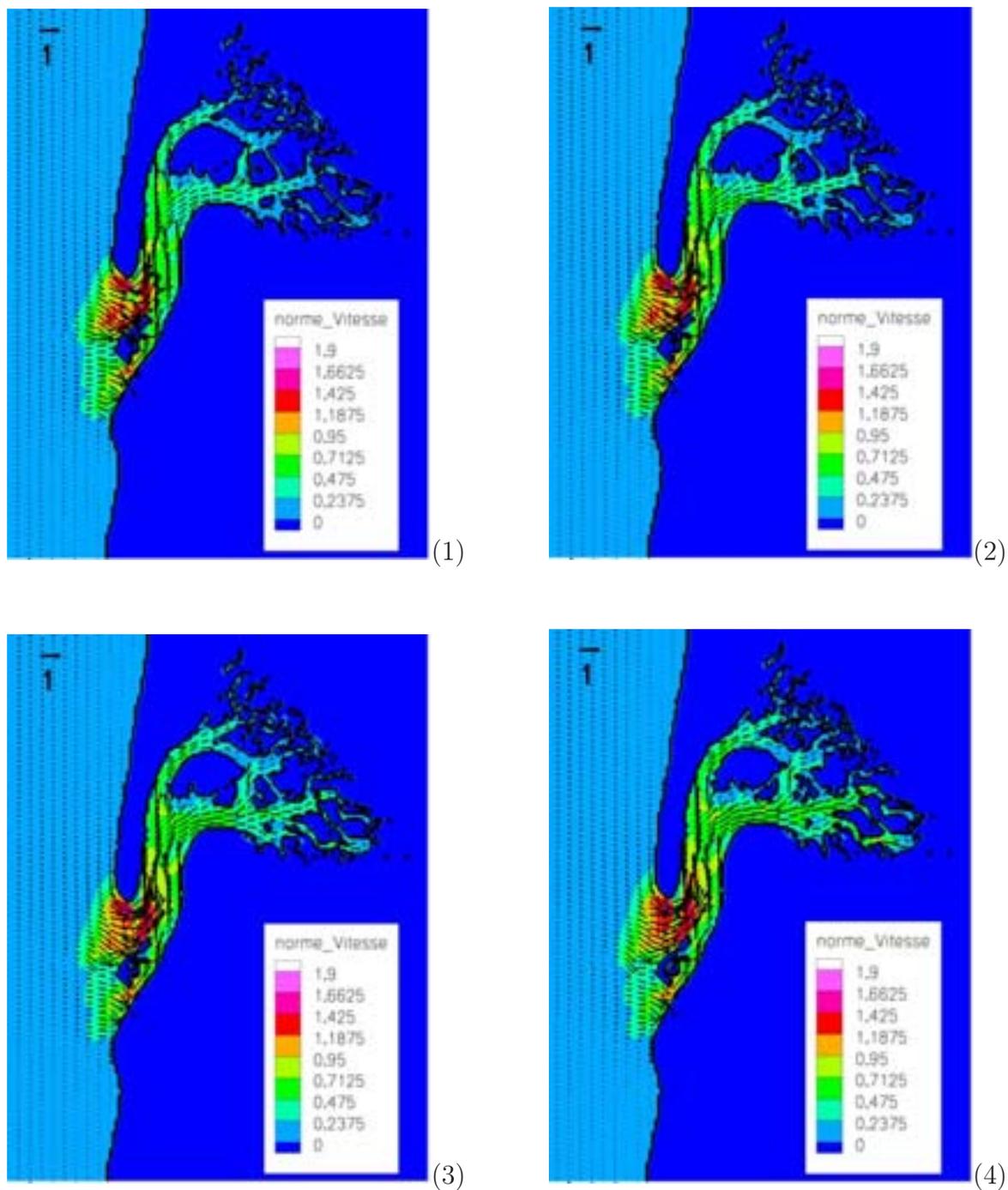


Figure A.1 : Superposition du champ du vecteur vitesse, de sa norme et de la frontière zone sèche/zone mouillée durant la simulation de la séquence n° 19, aux temps: (1) $t=5\text{h }33\text{min }20\text{s}$; (2) $t=5\text{h }46\text{min }40\text{s}$; (3) $t=6\text{h }00\text{min }00\text{s}$; (4) $t=6\text{h }13\text{min }20\text{s}$; (e) $t=6\text{h }26\text{min }40\text{s}$; (f) $t=6\text{h }40\text{min }00\text{s}$.

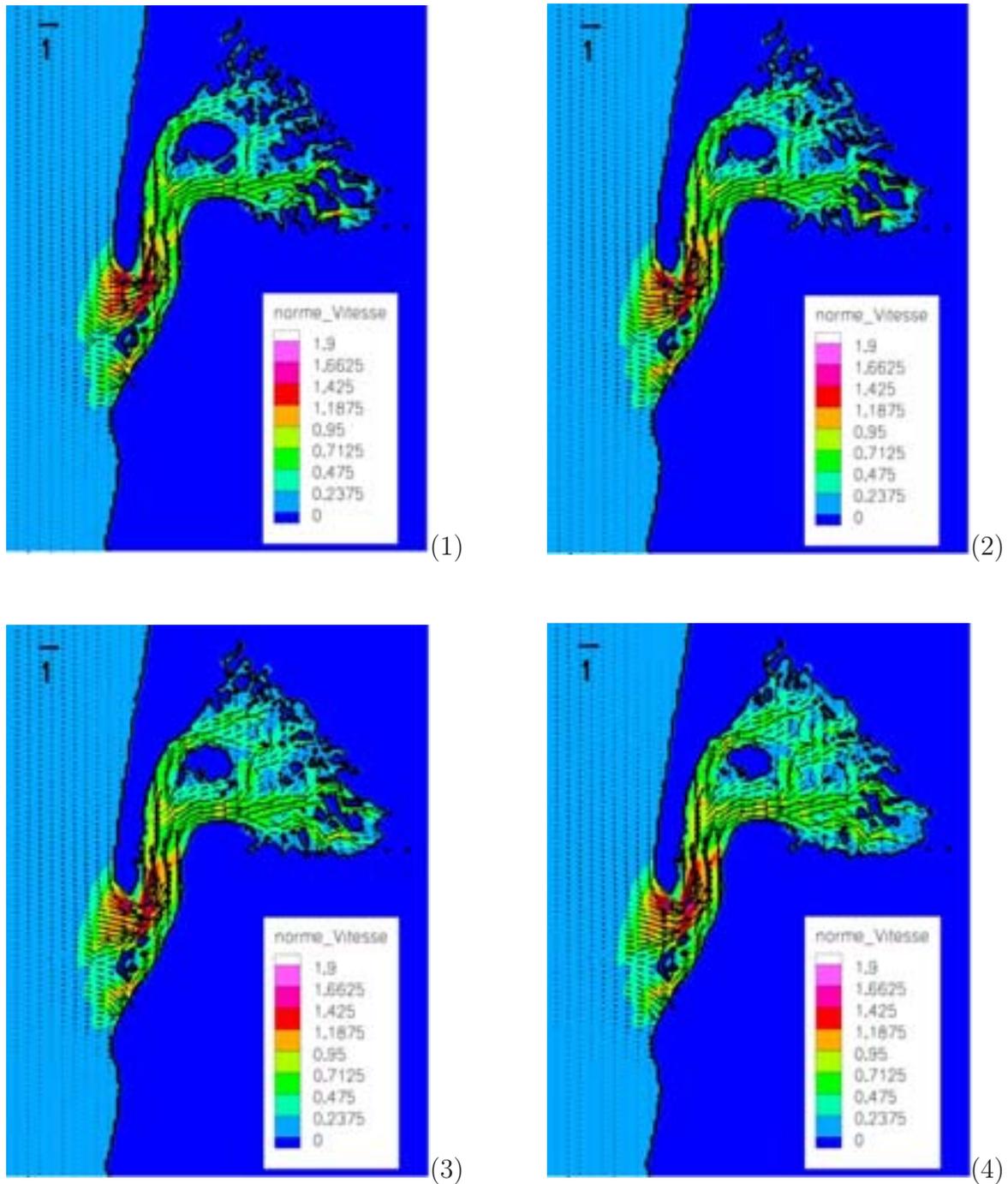


Figure A.2 : *Superposition du champ du vecteur vitesse, de sa norme et de la frontière zone sèche/zone mouillée durant la simulation de la séquence n° 19, aux temps: (1) $t = 6h 26min 40s$; (2) $t = 6h 40min 00s$; (3) $t = 6h 53min 20s$; (4) $t = 7h 06min 40s$.*

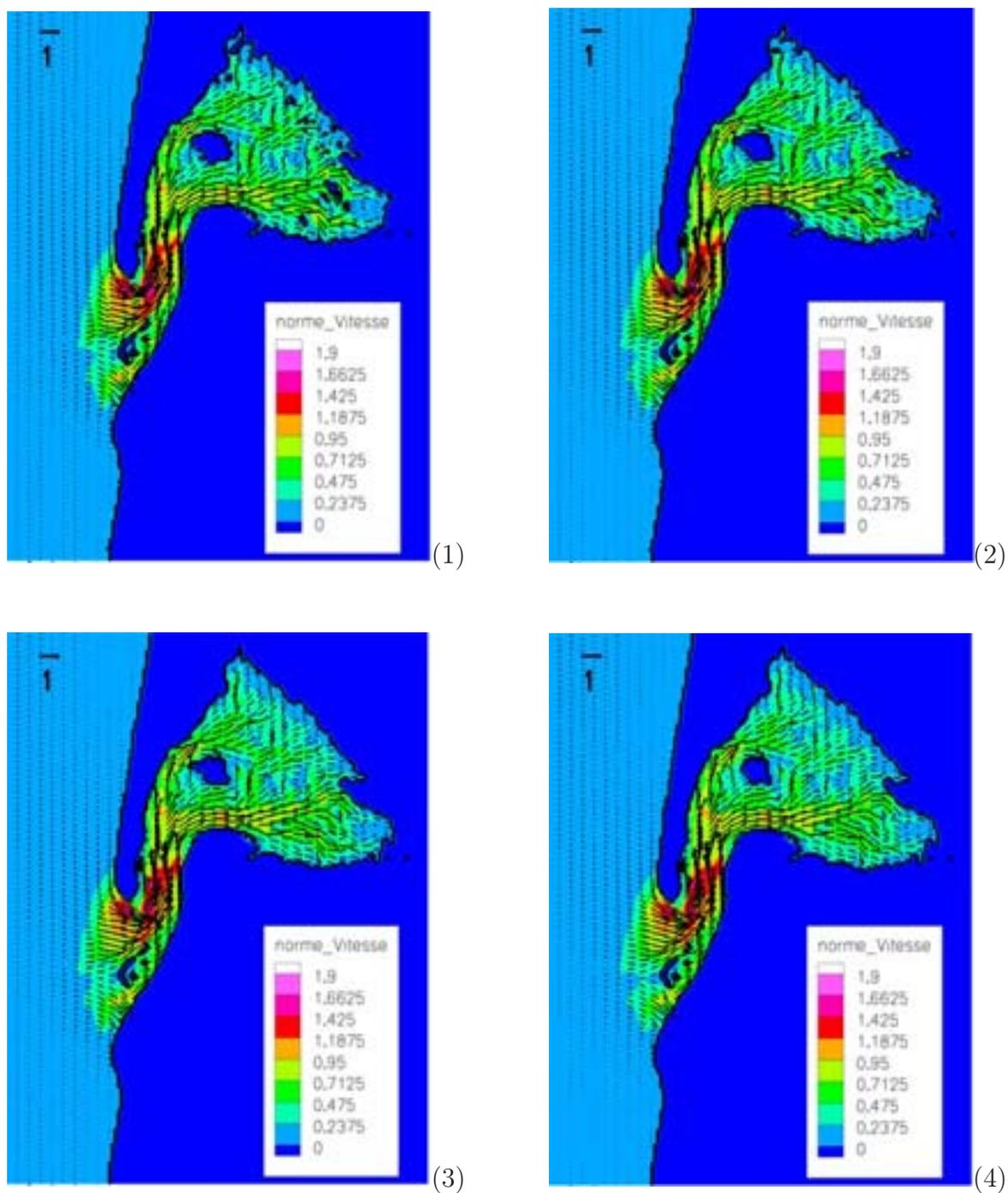


Figure A.3 : Superposition du champ du vecteur vitesse, de sa norme et de la frontière zone sèche/zone mouillée durant la simulation de la séquence n° 19, aux temps: (1) $t = 7h 20min 00s$; (2) $t = 7h 33min 20s$; (3) $t = 7h 46min 40s$; (4) $t = 8h 00min 00s$.

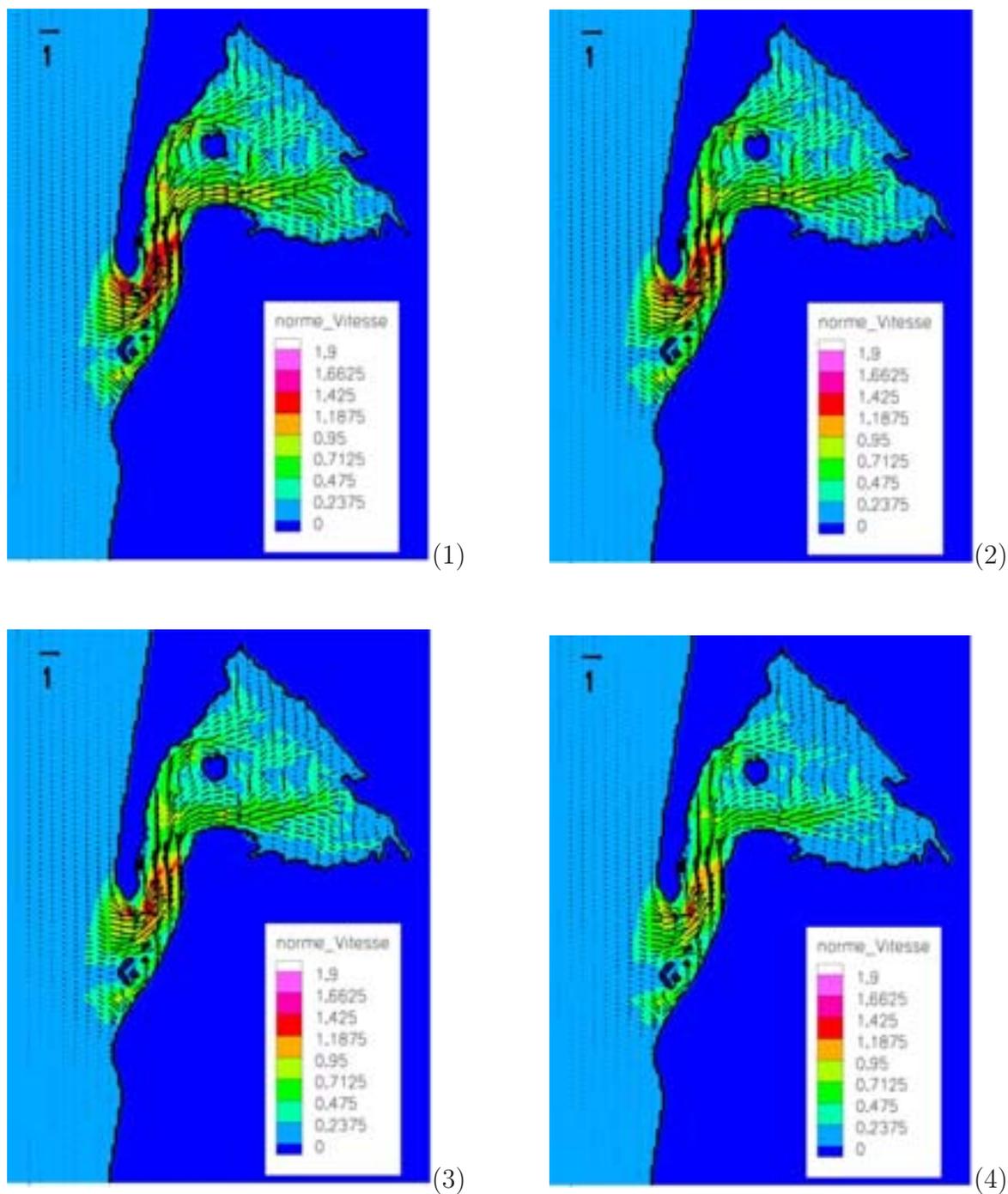


Figure A.4 : Superposition du champ du vecteur vitesse, de sa norme et de la frontière zone sèche/zone mouillée durant la simulation de la séquence n° 19, aux temps: (1) $t=8h\ 13min\ 20s$; (2) $t=8h\ 26min\ 40s$; (3) $t=8h\ 40min\ 00s$; (4) $t=8h\ 53min\ 20s$.

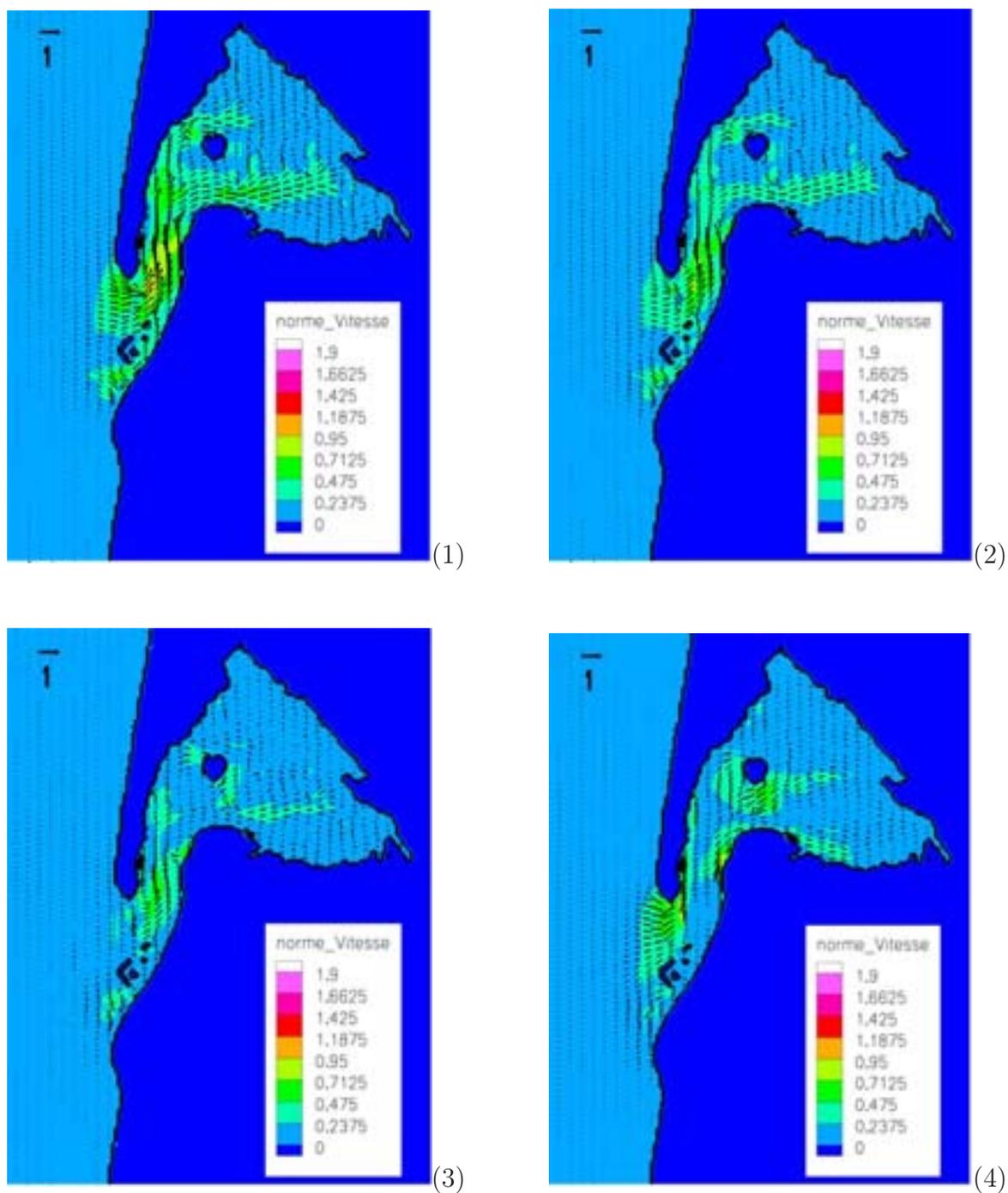


Figure A.5 : Superposition du champ du vecteur vitesse, de sa norme et de la frontière zone sèche/zone mouillée durant la simulation de la séquence n° 19, aux temps: (1) $t=9\text{h }06\text{min }40\text{s}$; (2) $t=9\text{h }20\text{min }00\text{s}$; (3) $t=9\text{h }33\text{min }20\text{s}$; (4) $t=10\text{h }06\text{min }40\text{s}$.

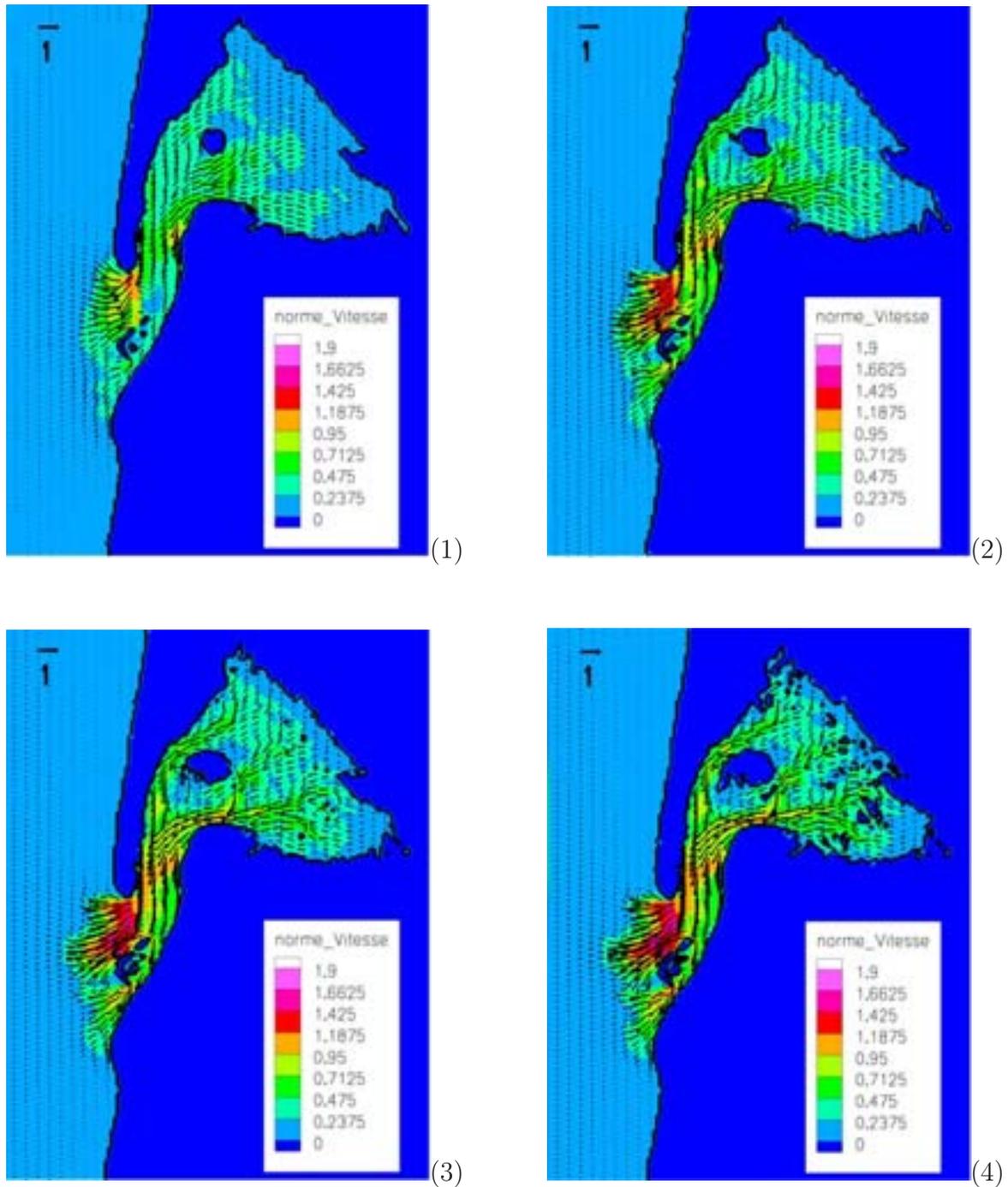


Figure A.6 : Superposition du champ du vecteur vitesse, de sa norme et de la frontière zone sèche/zone mouillée durant la simulation de la séquence n° 19, aux temps: (1) $t=10\text{h }33\text{min }20\text{s}$; (2) $t=11\text{h }00\text{min }00\text{s}$; (3) $t=11\text{h }40\text{min }00\text{s}$; (4) $t=12\text{h }00\text{min }00\text{s}$

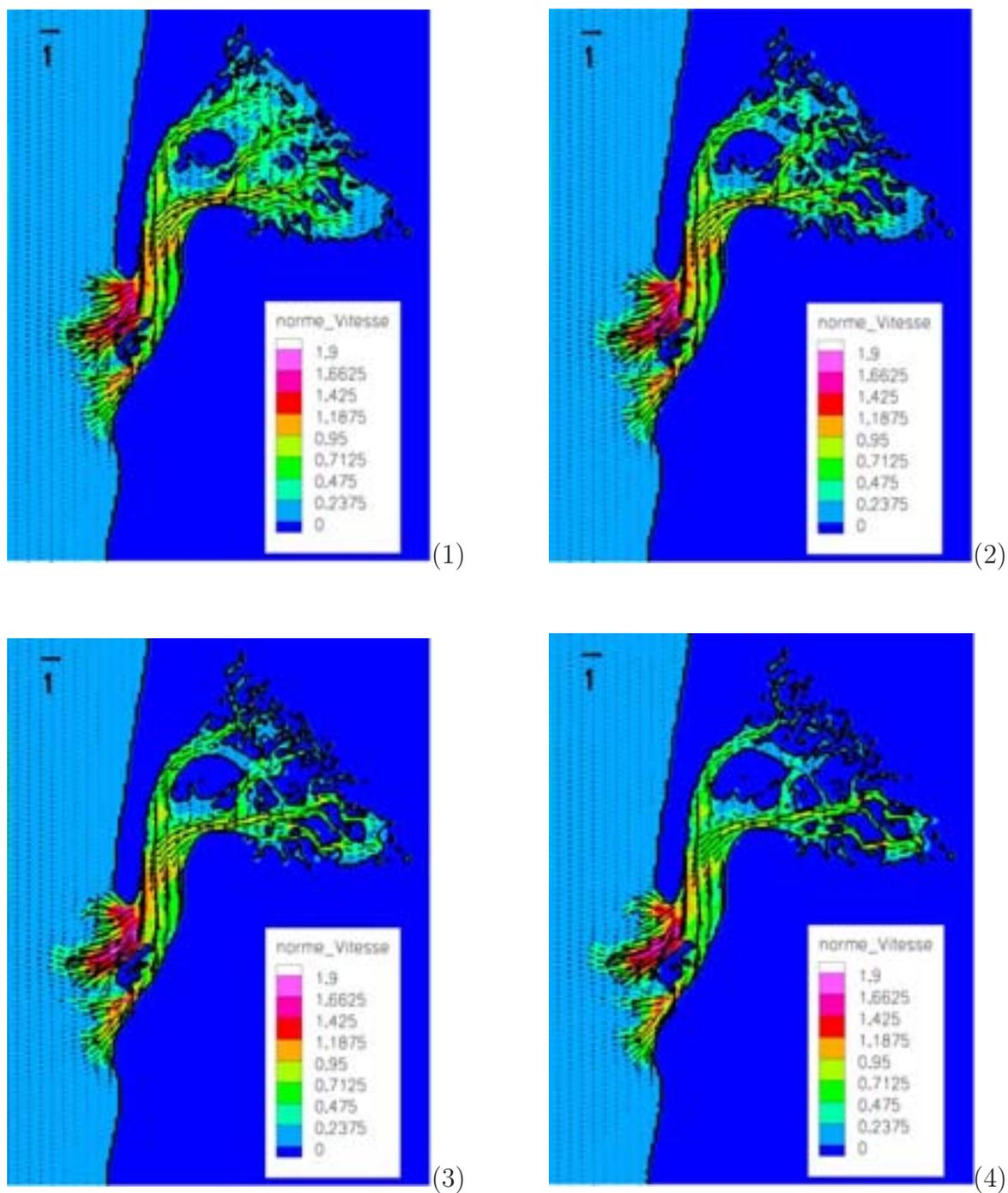


Figure A.7 : Superposition du champ du vecteur vitesse, de sa norme et de la frontière zone sèche/zone mouillée durant la simulation de la séquence n° 19, aux temps: (1) $t = 12h 13min 20s$; (2) $t = 12h 33min 20s$; (3) $t = 12h 53min 20s$; (4) $t = 13h 10min 20s$

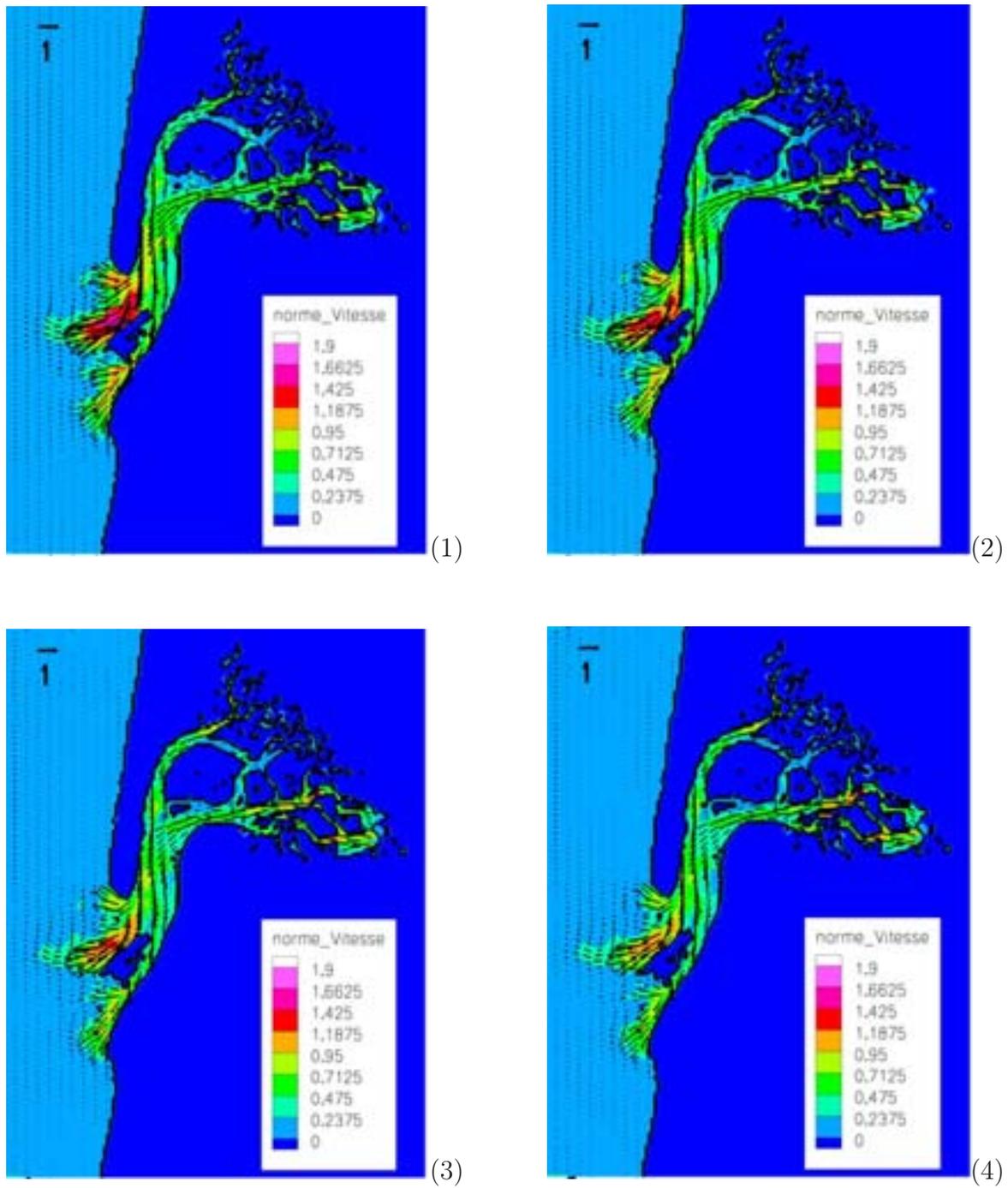


Figure A.8 : *Superposition du champ du vecteur vitesse, de sa norme et de la frontière zone sèche/zone mouillée durant la simulation de la séquence n° 19, aux temps: (1) $t=13h\ 30min\ 20s$; (2) $t=13h\ 50min\ 20s$; (3) $t=14h\ 17min\ 00s$; (4) $t=14h\ 37min\ 00s$*

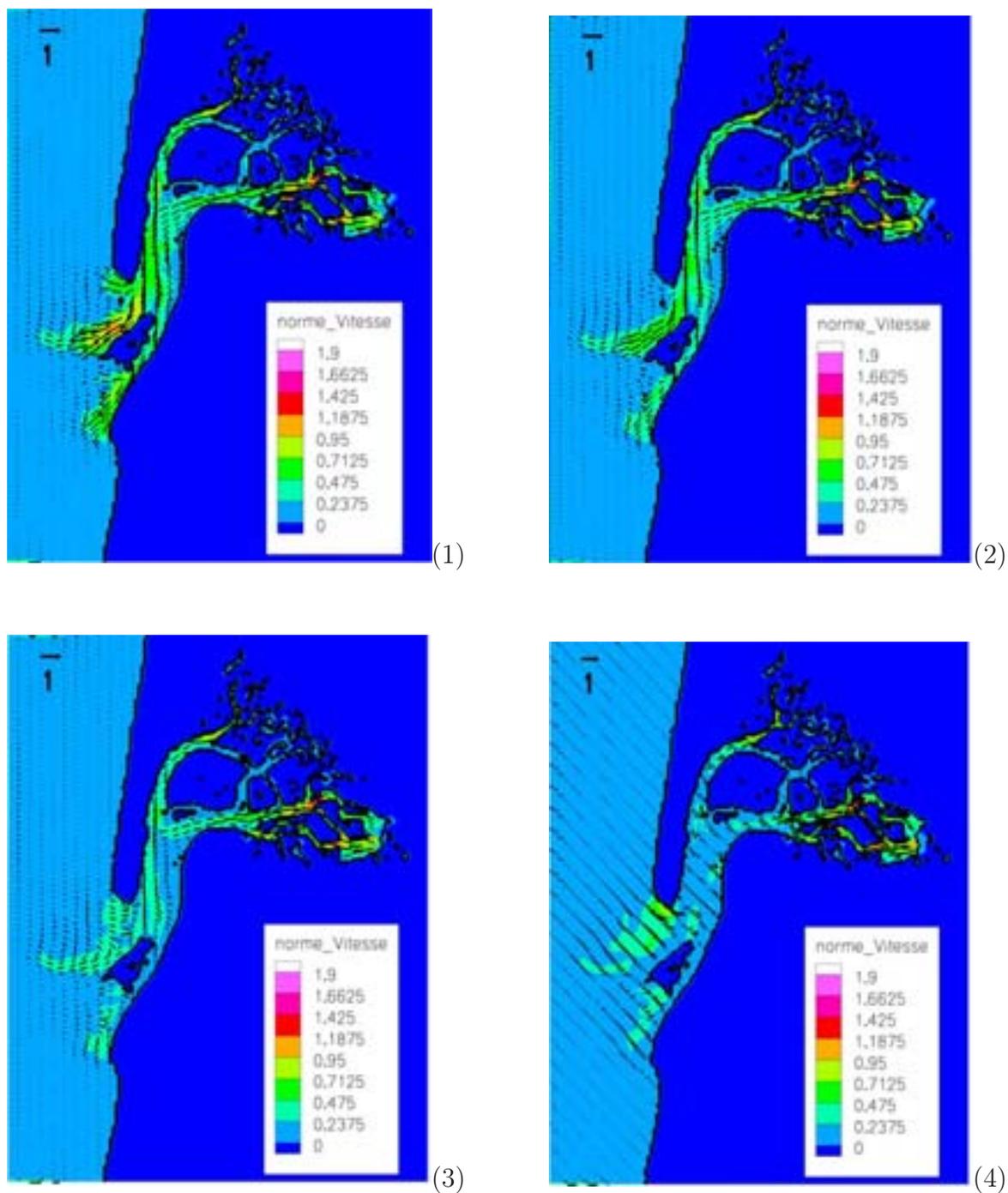


Figure A.9 : Superposition du champ du vecteur vitesse, de sa norme et de la frontière zone sèche/zone mouillée durant la simulation de la séquence n° 19, aux temps: (1) $t=14h\ 57min\ 00s$; (2) $t=15h\ 23min\ 40s$; (3) $t=15h\ 43min\ 40s$; (4) $t=16h\ 03min\ 40s$

Bibliographie

[]

[Agoshkov 93] V.I. AGOSHKOV, D. AMBROSI, V. PENNATI, A. QUARTERONI & F. SALERI. *Mathematical and numerical modelling of shallow water flow*. Computational Mechanics, vol. 11, p. 280–299, 1993.

[And] *cited in <http://www-gap.dcs.st-and.ac.uk/history/Mathematicians/Saint-Venant.html>*. site internet.

[Angot 99] P. ANGOT, C.H. BRUNEAU & FABRIE P. *A penalization method to take into account obstacles in viscous flows*. Num. Math., vol. 81, p. 497–520, 1999.

[Annan 01] J. D. ANNAN. *Hindcasting Coastal Sea Levels in Morecambe Bay*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol. 53, p. 459–466, 2001.

[Audusse 04] E. AUDUSSE. *Modélisation hyperbolique et analyse numérique pour les écoulements en eaux peu profondes, 183 p.* Thèse de doctorat, Univ. Paris "sept", France, 2004.

[Bale 02] D. S. BALE, R. J. LEVEQUE, S. MITRAN & J. A. ROSSMANITH. *A wave propagation method for conservation laws and balance laws with spatially varying flux functions*. SIAM J. Sc. Comp., vol. 24 (3), p. 955–978, 2002.

[Balzano 96] A. BALZANO. *A semi-implicit model for 2D tidal flow currents*. Internal report, CRS4, 1996.

[Balzano 98] A. BALZANO. *Evaluation of methods for numerical simulation of wetting and drying in shallow water flow models*. Coast. Eng., vol. 34, p. 83–107, 1998.

- [Benque 82] J.P. BENQUE, J.A. CUNGE, A. HAUGUEL J. FEUILLET & F.M. JR. HOLLY. *New method for tidal current computation*. J. Waterways, Port, Coastal Ocean Division J., vol. ASCE 108, p. 396–417, 1982.
- [Butel 02] R. BUTEL, H. DUPUIS & P. BONNETON. *Spatial variability of wave conditions on the french atlantic coast using in-situ data*. J. Coast. Research, 2002.
- [Camenen 02] B. CAMENEN. *Modélisation numérique du transport sédimentaire sur une plage sableuse*. Thèse de doctorat, Univ. Joseph Fourier, Grenoble, France, 2002.
- [Carrier 57] G. F. CARRIER & H.P. GREENSPAN. *Water waves of finite amplitude on a slopping beach*. J. Fluid. Mech, vol. 4, p. 97–109, 1957.
- [Casulli 90] V. CASULLI. *Semi-implicit Finite-Difference Methods for the Two-dimensional Shallow Water Equations*. J. Comput. Phys., vol. 86, p. 56–74, 1990.
- [Casulli 93] V. CASULLI & R. T. CHENG. *Semi-implicit finite difference methods for three-dimensional shallow water flow*. Int. J. Num. Methods in Fluids, vol. 15, p. 629–648, 1993.
- [Casulli 94] V. CASULLI & E. CATTANI. *Stability, Accuracy and Efficiency of a Semi-implicit Method for Three-Dimensional Shallow Water Flow*. Computers & Mathematics with Applications, vol. 27, p. 99–112, 1994.
- [Casulli 97] V. CASULLI. *Numerical simulation of three-dimensional free surface flow in isopycnal co-ordinates*. Inter. J. Num. Methods in Fluids, vol. 25, p. 645–658, 1997.
- [Casulli 98a] V. CASULLI & G. S. STELLING. *Numerical Simulation of 3D quasi-hydrostatic free-surface flows*. J. Hydr. Eng., ASCE, vol. 124, p. 678–686, 1998.
- [Casulli 98b] V. CASULLI & P. ZANOLLI. *A Three-dimensional Semi-implicit Algorithm for Environmental Flows on Unstructured Grids*. Proc. of

- Conf. On Num. Methods for Fluid Dynamics, University of Oxford, UK, 1998.
- [Casulli 99a] V. CASULLI. *A semi-implicit finite difference method for non-hydrostatic, free-surface flows*. Inter. J. for Num. Methods in Fluids, vol. 30, p. 425–440, 1999.
- [Casulli 99b] V. CASULLI. *A semi-implicit numerical method for non-hydrostatic free surface flows on unstructured grid*. Proceedings, Inter. Workshop on Numerical Modelling of Hydrodynamic Systems, Zaragoza, Spain, June 1999.
- [Casulli 00] V. CASULLI & R. A. WALTERS. *An unstructured grid, three-dimensional model based on the shallow water equations*. Inter. J. Num. Methods in Fluids, vol. 32, p. 331–348, 2000.
- [Cayocca 96] F. CAYOCCA. *Modélisation morphodynamique d'une embouchure tidale: Application aux passes d'entrée du Bassin d'Arcachon*. Thèse de doctorat, Univ. Bordeaux 1, France, 1996.
- [Cayocca 01] F. CAYOCCA. *Long-term morphological modeling of a tidal inlet: The Arcachon Basin, France*. Coast. Eng., vol. 42, p. 115–142, 2001.
- [Cheng 93a] R. T. CHENG, V. CASULLI & J. W. GARTNER. *Tidal, Residual, Intertidal Mudflat (TRIM) Model and its Applications to San Francisco Bay, California*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol. 36, p. 235–280, 1993.
- [Cheng 93b] R. T. CHENG, V. CASULLI & J. W. GARTNER. *Tidal, residual, intertidal mudflat (TRIM) model and its applications to San Francisco Bay, California*. Estuarine, Coastal, and Shelf Science, vol. 36, p. 235–280, 1993.
- [Cheng 98] R. T. CHENG & R. E. SMITH. *A Nowcast Model for Tides and Tidal Currents in San Francisco Bay, California*. Ocean Community Conf. '98,, Baltimore, USA, Nov. 15-19 1998. Marine Technology Society.

- [Cheng 00] R. T. CHENG & R. E. SMITH. *San Francisco Bay Marine Nowcast System*. Proceedings of 2000 Inter. Conf. on Hydrosience and Engineering, Seoul, Korea, Sept. 25-29 2000.
- [Collectif 73] LCFH COLLECTIF. *Etude hydraulique du bassin d'Arcachon, Service Maritime du département de la Gironde. Mission Interministérielle d'Aménagement de la Côte Atlantique*. Rapport d'étude, LCFH, 1973.
- [Collectif 97] IFREMER COLLECTIF. *Etude intégrée du Bassin d'Arcachon*. Rapport interne, Ifremer DEL/97.09/Ar, 1997.
- [Collectif 03] SIBA COLLECTIF. *Système d'assainissement intercommunal, élaboration du dossier d'étude d'impact valant document d'incidence au titre de code de l'Environnement, en vue d'autoriser l'extension des stations d'épuration de Biganos et de La Teste de Buch, ainsi que le renouvellement du rejet en mer du Warf de la Salie*. Rapport interne, SIBA, 2003.
- [de Saint Venant 71] A.J.C. DE SAINT VENANT. *Théorie du mouvement non-permanent des eaux, avec application aux crues des rivières et à l'introduction des marées dans leur lit*. C. R. Acad. Sc., vol. 73, p. 147–154, 1871.
- [Dissez 05] A. LE DISSEZ, D. SOUS, S. VINCENT, J.P. CALTAGIRONE & A. SOTTOLICHIO. *Nouvelle méthode implicite pour la modélisation des écoulements en eau peu profonde*. Congrès Français de Mécanique, 2005, page Art. n°256, 2005.
- [Ehrhold 03] A. EHRHOLD, S. GUILLOU, J.P. AUFFRET, T. GARLAN & K. DAN NGUYEN. *Modélisation des flux sédimentaires charriés dans la baie du Mont-Saint-Michel (Manche, France)*. Oceanologica Acta, vol. 26, p. 443–455, 2003.
- [Falconer 85] R. A. FALCONER. *Residual currents in Port Talbot Harbour: A mathematical model study*. Proc. Insm. Civ. Engrs, vol. 77, p. 33–53, 1985.

- [Falconer 87] R. A. FALCONER & P.H. OWENS. *Numerical simulation of flooding and drying in a depth-averaged tidal flow model*. Proc. Instn. Civ. Engrs, vol. Part 2, Mar. 83, p. 161–180, 1987.
- [Figué 96] J. F. FIGUÉ. *Modélisation numérique des écoulements compressibles en milieu poreux. Application à la détente de Joule-Thomson*. Thèse de doctorat, Univ. Bordeaux 1, France, 1996.
- [Flather 75] R. A. FLATHER & N. S. HEAPS. *Tidal computations for Morecambe Bay*. Geophys. J. R. Astr. Society, vol. 42, p. 489–517, 1975.
- [Flather 91] R. A. FLATHER & K. P. HUBBERT. *Tide and surge models for shallow water - Morecambe Bay revisited*. A. M. Davies, CRC Publications, Boca Raton, FL, 1991.
- [Fortin 82] M. FORTIN & R. GLOWINSKI. *Méthode de lagrangien augmenté. Application à la résolution numérique des problèmes aux limites*. Collection méthodes mathématiques de l'informatique, Dunod, Paris, 1982.
- [Fredsoe 93] J. FREDSOE. *Modelling of non-cohesive sediment transport processes in the marine environment*. Coastal Eng., vol. 21, p. 71–103, 1993.
- [Gassiat 89] L. GASSIAT. *Hydrodynamique et évolution sédimentaire d'un système lagune-flèche littorale - Le bassin d'Arcachon et la Flèche du Cap Ferret*. Thèse de doctorat, Univ. Bordeaux 1, France, 1989.
- [Georges 95] K. J. GEORGES & S. STRIPLING. *Improving the simulation of drying and wetting in a two-dimensional tidal numerical model*. Appl. Math. Modelling, vol. 19, 1995.
- [Glockner 01] S. GLOCKNER. *Aquilon, Notice théorique et numérique*. Technical report, 2001.
- [Greenberg 05] D. A. GREENBERG, J. A. SHORE, F. H. PAGE & M. DOWD. *A finite element circulation model for embayments with drying intertidal areas and its application to the Quoddy region of the Bay of Fundy*. Ocean Modelling, vol. 10, p. 211–231, 2005.

- [Gross 98] E. S. GROSS, CASULLI V., L. BONAVENTURA & J. R. KOSEFF. *A semi-implicit method for vertical transport in multidimensional models*. Inter. J. Num. Methods in Fluids, vol. 28, p. 157–186, 1998.
- [Harten 87] A. HARTEN & S. OSHER. *Uniformly high order accurate non-oscillatory schemes*. Siam J. Num. Anal., vol. 24, page 279, 1987.
- [Heniche 00] M. HENICHE, Y. SECRETAN, P. BOUDREAU & M. LECLERC. *A two-dimensional finite element drying-wetting shallow water model for rivers and estuaries*. Adv. Water Resources, vol. 23, p. 359–372, 2000.
- [Hervouet 96] J.M. HERVOUET & L. VAN HAREN. *TELEMAC2D Version 3.0 Principle Note*. Rapport interne, he-4394052b, EDF , Electricité de France, Département Laboratoire National d’Hydraulique, Chatou, CEDEX, 1996.
- [Hibbert 79] S. HIBBERT & D.H. PEREGRINE. *Surf and runup on a beach: a uniform bore*. J.Fluid Mech., vol. 95, p. 323–345, 1979.
- [Hinterberger 03] C. HINTERBERGER, J. FRIEDLICH & W. RODI. *Three-dimensional and depth average Large Eddy Simulation of Shallow Water Flows*. International Symposium on Shallow Flows, Delft University of Technology, The Netherlands, 2003.
- [Hir 00] P. LE HIR, W. ROBERTS, O. CAZAILLET, M. CHRISTIE, P. BASSOULET & C. BACHER. *Characterization of intertidal flat hydrodynamics*. Continental Shelf Res., vol. 20, p. 1433–1459, 2000.
- [Hodges 00] B. R. HODGES. *Numerical techniques in CWR-ELCOM*. Technical report, CWR manuscrypt, WPn1422 BH, 2000.
- [Holz 82] K.P. HOLZ & G. NITSCHKE. *Tidal wave analysis for estuaries with intertidal flats*. Adv. Water Resources, vol. 5, p. 142–148, 1982.
- [Ip 98] J. T. C. IP, D. R. LYNCH & C. T. FRIEDRICH. *Simulation of Estuarine Flooding and Dewatering with Application to Great Bay, New Hampshire*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol. 47, p. 119–141, 1998.

- [Jiang 96] G.S. JIANG & C.W. SHU. *Efficient Implementation of Weighted ENO Schemes*. J. Comput. Phys, vol. 126, p. 202–228, 1996.
- [Jiang 05] Y.W. JIANG & W.H. WAI ONYX. *Drying-wetting approach for 3D finite element sigma coordinate model for estuaries with large tidal flats*. Adv. in Water Resources, vol. 28, p. 779–792, 2005.
- [Khadra 00] K. KHADRA, S. PARNEIX, P. ANGOT & J.P. CALTAGIRONE. *Fictitious domain approach for numerical modelling of Navier-Stokes equations*. Int. J. Num. Meth. in Fluids, vol. 341, p. 651–684, 2000.
- [Kobayashi 89] N. KOBAYASHI, G.S. DESILVA & K.D. WATSON. *Wave transformation and swash oscillation on gentle and steep slopes*. J. Comput. Phys., vol. 86, p. 951–966, 1989.
- [Kowalik 82] Z. KOWALIK & T.S. MURTY. Numerical Modeling of Ocean Dynamics. World Scientific, Singapore, 1982.
- [Lamb 32] H. LAMB. Hydrodynamics. Cambridge University Press, New York, 1932.
- [Leendertse 70] J.J. LEENDERTSE. *A Water-quality Simulation Model for Well-mixed Estuaries and Coastal Seas*. Principles of Computation, numéro RM-6230-RC, Santa Monica, USA, February 1970.
- [LeVeque 90] R.J. LEVEQUE & H.C. YEE. *A study of numerical methods for hyperbolic conservation laws with stiff source terms*. J. Comput. Phys, vol. 86, p. 187–210, 1990.
- [Lin 97] B. LIN & R.A. FALCONER. *Three-dimensional layer-integrated modeling of estuarine flows with flooding and drying*. Estuarine, Coastal and Shelf Science, vol. 44, p. 737–751, 1997.
- [L’Yavanc 95] J. L’YAVANC. *Evolutions bathymétriques et morphologiques du Bassin d’Arcachon*. Rapport interne, Ifremer DEL/95-12, 1995.
- [MacDonald 96] I. MACDONALD. *Analysis and computation of steady open channel flow*. Thèse de doctorat, Department of Mathematics, University of Reading, UK, 1996.

- [Milbradt 02] P. MILBRADT. *A stabilized finite element method for systems of instationary advection-dominated equations in multi-dimensional domains*. Proceedings of fifth World Congress on Computational Mechanics, numéro WCCM V, Vienna, Austria, 2002. Eds. Mang, Rammerstorfer, Eberhardsteiner.
- [Mitchell 80] A.R. MITCHELL & D.F. GRIFFITHS. *A Water-quality Simulation Model for Well-mixed Estuaries and Coastal Seas, The finite difference method in partial differential equations*. John Wiley, 1980.
- [Molinaro 94] P. MOLINARO, A. DI FILIPPO & F. FERRARI. *Modelling of flood wave propagation over flat dry areas of complex topography in presence of different Infrastructures*. Proc. Specialty Conference on Modelling of Flood Propagation Over Initially Dry Areas, Vienna, Austria, 1994. ASCE.
- [Nguyen 06] D.K. NGUYEN, Y.E. SHI, S.S.Y. WANG & T.H. NGUYEN. *2D shallow-water model using unstructured finite-volume methods*. J. Hyd. Eng., 2006.
- [Okubo 73] A. OKUBO. *Effect of shoreline irregularities on streamwise dispersion in estuaries and other embayments*. Netherlands Journal of Sea Research, vol. 6, p. 213–224, 1973.
- [Patankar 80] S.V. PATANKAR. *Numerical heat transfer and fluid flow*. Hemisphere Publishing Corporation, New York (USA), 1980.
- [Pedlosky 87] J. PEDLOSKY. *Geophysical Fluid Dynamics*. Springer Editions, 1987.
- [Peraire 86] J. PERAIRE & O.C. ZIENKIEWICZ. *Shallow water problems: a general explicit formulation*. Int. J. Num. Math. in Eng., vol. 22, p. 547–574, 1986.
- [Plus 04] M. PLUS & N. DURAND. *Le modèle hydrodynamique du Bassin d’Arcachon. Description générale et validation*. Rapport interne, Ifremer DEL/AR/04-04, 2004.

- [Pluss 04] A. D. PLUSS & H. SCHÜTTRUMPH. *Comparison of numerical tidal models for practical applications*. ICCE, Lissabon, 2004.
- [Rosatti 90] G. ROSATTI, D. CESARI & L. BONAVENTURA. *Semi-implicit, semi-Lagrangian modelling for environmental problems on staggered Cartesian grids with cut cells*. 1990.
- [Saint-Cast 02] F. SAINT-CAST. *Modélisation de la morphodynamique des corps sableux en milieu littoral*. Thèse de doctorat, Univ. Bordeaux 1, France, 2002.
- [Salomon 95] J. C. SALOMON & M. BRETON. *Arcachon - l'hydrodynamique par la modélisation mathématique*. Rapport interne, Ifremer DEL/12-95/HS, 1995.
- [Scardovelli 99] R. SCARDOVELLI & S. ZALESKI. *Direct numerical simulation of free-surface and interfacial flow*. *Ann. Rev. Fluid. Mech.*, vol. 31, p. 567–603, 1999.
- [Shin 99] S. SHIN & D. JURIC. *Modeling Three-Dimensional Multiphase Flow Using a Level Contour Reconstruction Method for Front Tracking without Connectivity*. *J. Comput. Phys*, vol. 180, p. 81–124, 1999.
- [Sottolichio 99] A. SOTTOLICHIO. *Modélisation de la dynamique des structures turbides (bouchon vaseux et crème de vase) dans l'estuaire de la Gironde*. Thèse de doctorat, Univ. Bordeaux 1, France, 1999.
- [Sous 04] D. SOUS, N. BONNETON & J. SOMMERIA. *Turbulent vortex dipoles in a shallow water layer*. *Phys. Fluids*, vol. 16 (8), 2004.
- [Stelling 84] G.S. STELLING. *On the construction of computational methods for shallow water flow problems*. Rijkswaterstaat communication, 1984.
- [Stelling 86] G.S. STELLING, A.K. WIERSMA & J.B.T.M. WILLEMSE. *Practical aspects of accurate tidal computations*. *J. Hydraulic Eng.*, vol. 112 (9), p. 802–817, 1986.
- [Stigebrandt 80] A. STIGEBRANDT. *Some aspects of tidal interaction with fiord*. *Estuarine Coastal Marine Sc.*, vol. 11 (2), p. 151–166, 1980.

- [Sussman 99] M. SUSSMAN, A.S. ALMGREN, J.B. BELL, P. COLELLA, L.H. HOWELL & M.L. WELCOME. *An Adaptive Level Set Approach for Incompressible Two-Phase Flows*. J. Comput. Phys., vol. 148, p. 427–470, 1999.
- [Thacker 81] W.C. THACKER. *Some exact solutions to the nonlinear shallow-water wave equations*. J. Fluid Mechanics, vol. 107, p. 499–508, 1981.
- [Thauront 94] F. THAURONT. *Les transits sédimentaires subtidaux dans les passes internes du Bassin d’Arcachon*. Thèse de doctorat, Univ. Bordeaux 1, France, 1994.
- [Thomas 90] W. A. THOMAS, W. H. JR MCANALLY & J. V. JR. LETTER. *A Two-Dimensional Model for Free Surface Flows : Appendix F*. Technical report, User Instructions for RMA-2V, 1990.
- [Toro. 97] E.F. TORO. *Riemann solvers and upwind methods for fluid dynamics*. Springer Editions, Berlin, 1997.
- [Tseng 04] M.H. TSENG. *Improved treatment of source terms in TVD scheme for shallow water equations*. Adv. Water Ressources, vol. 27, p. 617–629, 2004.
- [Uijtewaal 03] W.S.J UIJTEWAAL & G.H. JIRKA. *Grid turbulence in shallow flows*. J. Fluid Mech., vol. 489, p. 325–344, 2003.
- [Uittenbogaard 03] R.E. UITTENBOGAARD & B. VAN VOSSEN. *Subgrid-scale model for Quasi-2D turbulence in shallow water*. International Symposium on Shallow Flows, Delft University of Technology, The Netherlands, 2003.
- [van de Kreeke 88] J. VAN DE KREEKE. *Hydrodynamics of tidal inlets*. Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies, Springer-Verlag, New York., 1988.
- [van der Vorst 92] H.A. VAN DER VORST. *BI-CGSTAB: A fast and smoothly converging variant of BI-CG for the solution of nonsymmetric linear sys-*

- tem.* Siam J. Sci. Stat. Comput. J. Fluid Mech., vol. 13 (2), p. 631–644, 1992.
- [Vazquez-Cendon 99] M.E. VAZQUEZ-CENDON. *Improved treatment of source terms in upwind schemes for shallow water equations in channel with irregular geometry.* J. Comp. Phys., vol. 148, p. 497–526, 1999.
- [Vincent 99] S. VINCENT & J.P. CALTAGIRONE. *Efficient solving method for unsteady in compressible interfacial flow problems.* Int. J. Numer. Meth. Fluids, vol. 3, p. 795–811, 1999.
- [Vincent 00] S. VINCENT & J.P. CALTAGIRONE. *A One-Cell Local Multigrid Method for Solving Unsteady Incompressible Multiphase Flows.* J. Comput. Phys., vol. 163, p. 75–215, 2000.
- [Vincent 01] S. VINCENT, P. BONNETON & J.P. CALTAGIRONE. *Numerical modelling of bore propagation and run-up on sloping beaches using a Mac-Cormack TVD scheme.* J. Hyd. Res., vol. 39, p. 41–49, 2001.
- [Vreugdenhil 90] C.B. VREUGDENHIL. *Numerical methods for shallow water flows.* Von Karmann Institute for fluid dynamics, Lecture series, p. 1903–1990, 1990.
- [Vriend 93] H.J. DE VRIEND, M. CAPOBIANCO, T. CHESHER, H.E. DE SWART, B. LATTEUX & M.J.F. STIVE. *Approaches to long-term modelling of coastal morphology: a review.* Coast. Eng., vol. 21, p. 225–269, 1993.
- [Wang 95] Z.B. WANG, T. LOUTERS & H.J. DE VRIEND. *Morphodynamic modelling for a tidal inlet in the Wadden Sea.* Marine Geology, vol. 126, p. 289–300, 1995.

Modélisation numérique des écoulements tidaux en milieux peu profonds. Application à l'étude de l'hydrodynamique du bassin d'Arcachon.

Résumé :

L'objectif de la thèse est de développer un outil numérique pour la simulation des écoulements générés dans les milieux peu profonds que sont des baies tidales. Ces lagunes, protégées de la houle par un système de flèche et de passes, présentent des étendues intertidales considérables, alternativement couvertes et découvertes par l'oscillation du plan d'eau au cours de la marée. Leurs bathymétries, faites de réseaux de chenaux creusant les estrans, sont souvent fortement irrégulières. Nous cherchons donc à construire un code robuste et précis, associant de manière originale des modèles et des méthodes numériques disponibles dans la bibliothèque numérique d'un logiciel préexistant (AQUILON), dans le but de satisfaire simultanément les conditions fortes suivantes : résoudre les équations en eaux peu profondes hyperboliques (équations de Saint-Venant), permettre l'utilisation de grands pas de temps et la gestion de topographies irrégulières, enfin traiter convenablement les zones intertidales. L'outil numérique réalisé résout implicitement les équations de l'écoulement sur une grille cartésienne fixe décalée et une méthode de pénalisation assure le traitement des zones intertidales. Le code est d'abord validé sur des cas tests académiques puis appliqué à l'étude d'un site côtier naturel à bathymétrie irrégulière: le Bassin d'Arcachon. L'ajustement de l'hydrodynamique nous permet d'une part de montrer la validité de notre modèle sur site réel, d'autre part de proposer une description physique du comportement hydraulique de la lagune et d'émettre ensuite des hypothèses quant aux mouvements sédimentaires et aux évolutions morphodynamiques susceptibles d'être observés en son sein.

Mots clefs :

Modélisation, Ecoulements tidaux, Equations de Saint-Venant, Hydrodynamique, Hydrosédimentaire, Zone intertidale, Bassin d'Arcachon

Tidal flow modeling in shallow embayments. Application to the study of the hydrodynamics of the Arcachon lagoon

Abstract :

The thesis aims at designing a model for simulation of shallow coastal flows occurring in coastal environments such as tidal embayments. These bays are protected from the swell/waves by both sandy spits -or barriers- and inlets, and present extended intertidal flats, which are alternatively immersed or emerged due to the free surface oscillation during tide. Their bathymetries are generally complicated, composed with channels digging higher flats. In order to achieve a stable and accurate model that is able to satisfy simultaneously the four following abilities: solving the hyperbolic Shallow Water Equations (briefly SWE), taking the Wetting And Drying (WAD) processes into account as well as handling strongly irregular bottom bathymetries and large time steps required for coastal simulations with reasonable computing time cost, we combine in an original way numerical features available in a pre-existent software, Aquilon. A 2DH numerical model is designed, based on an implicit resolution of the SWE and a spatial discretisation on a fix staggered mesh. A penalty method ensures the numerical treatment of the WAD processes. After validated on several theoretical test cases, the model is applied to the numerical study of the hydrodynamics of a real shallow tidal embayment, the Arcachon Lagoon (Atlantic coast, France). This shows the capability of the model on a real irregular bottom site and gives us a physical description of the hydraulic behaviour of the lagoon that allows hypothesising sediment transport trends and morphological evolutions occurring in the bay.

Key words :

Modeling, Tidal flows , Shallow Water Equations, Hydrodynamics, Sediment transport, Intertidal Zone, Arcachon lagoon