



LES RECHARGEMENTS SEDIMENTAIRES D'AVANT-COTE: UNE NOUVELLE METHODE DE LUTTE CONTRE L'EROSION COTIERE
SHOREFACE NOURISHMENT: A NEW METHOD FOR FIGHTING AGAINST COASTAL EROSION

Programme LITEAU II
Rapport de fin de contrat

IMAGES (Institut de Modélisation et d'Analyse en Géo-Environnements et Santé) E.A. 4218
Raphaël CERTAIN, MCF,
Université de Perpignan Via Domitia, 52 av. Paul Alduy
66860 Perpignan
Tel : 04.68.66.20.57
Fax : 04.68.66.17.47
Email : certain@univ-perp.fr

Date : 27/07/2009

N° de contrat : CV05000192

Date du contrat : 27/01/2006

TABLE DES MATIERES

Synthèse.....	p.4
Résumés.....	p.14-15
Rapport scientifique.....	p.16
1- Descriptif du projet, contexte scientifique, objectifs initiaux et résultats scientifiques attendus	p.18
2- Hypothèses et dispositif méthodologique	p.21
3- Organisation interne et coordination	p.22
4- Déroulement des travaux	p.23
5- Résultats, apports et limites	p.25
Tâche A Impact sur le benthos	p.25
Tâche B Modélisation numérique	p.26
Tâche C Interface de modélisation	p.137
Tâche D Modélisation physique	p.138
Tâche E Estimation des coûts	p.161
Tâche F Suivi du projet	p.172
Tâche G Elaboration de guides	p.172
6- Adéquation des résultats aux objectifs initiaux	p.173
7- Actions de valorisation scientifique	p.173
8- Restitution destinées aux utilisateurs précisant les produits restitués	p.173
9- Conclusions et synthèse des travaux	p.174
10- Perspectives	p.176
Bibliographie.....	p.178

Annexe : Rapport spécifique sur l'impact sur le benthos de rechargements d'avant-côte
(Tâche A)

Annexe : Textes des publications

Annexe : Manuel d'utilisation des codes MODHYS et MODHOU

SYNTHESE

(destinée aux utilisateurs et gestionnaires publics)

LES RECHARGEMENTS SEDIMENTAIRES D'AVANT-COTE: UNE NOUVELLE METHODE DE LUTTE CONTRE L'EROSION COTIERE

PROGRAMME LITEAU II

Responsable scientifique du projet : Raphaël Certain, IMAGES UPVD

Partenaires scientifiques bénéficiaires : Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), Laboratoire des Ecoulements Géophysiques & Industriels (LEGI), Observatoire Océanologique de Banyuls, SOGREAH Ingénierie, CREOCEAN, Direction Régionale Languedoc-Roussillon de l'Équipement (DRE) (anciennement Service Maritime et de Navigation du Languedoc-Roussillon (SMNLR)), Conseil Général de l'Hérault (CG 34), SIVOM Leucate/Barcarès, Communauté d'Agglomération du Bassin de Thau (CABT)



CONTEXTE GENERAL

Sous la responsabilité scientifique de l'Université de Perpignan Via Domitia (UPVD- Raphaël Certain, certain@univ-perp.fr), L'Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), le Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI-Grenoble), la SOGREAH, le SIVOM de Leucate/Barcarès, La Communauté d'Agglomération du bassin de Thau (CABT), le Conseil Général 34, la Direction Régionale Languedoc-Roussillon de l'Équipement (DRE) (anciennement Service Maritime et de Navigation du Languedoc-Roussillon (SMNLR)), l'Observatoire Océanologique de Banyuls sur Mer et CREOCEAN se sont regroupés pour mener une étude sur la faisabilité de rechargements sous-marins sableux d'avant-côte afin de lutter contre l'érosion côtière. Le présent projet de recherche est intitulé : « Les rechargements sédimentaires d'avant-côte : une nouvelle méthode de lutte contre l'érosion côtière ». Il cherche à répondre aux grandes orientations préconisées dans le cadre du programme LITEAU II (Ministère de l'Écologie, du Développement et de l'Aménagement durables) et notamment celles relatives à la gestion du trait de côte, en visant :

- à assurer une continuité avec des programmes scientifiques existants ;
- à consolider et valoriser les avancées scientifiques actuelles en appliquant les développements à des cas concrets ;
- à réunir au sein d'un même projet des organismes de recherche spécialistes en environnement du littoral et des utilisateurs potentiels ;
- à étudier des mécanismes de réhabilitation et de restauration des milieux altérés, tout en réalisant une analyse coût-bénéfice ;
- à être un futur outil d'aide à la décision et d'accompagnement scientifique d'initiatives d'intervention.

OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

L'objectif est d'étudier la possibilité d'utiliser les rechargements sédimentaires d'avant-côte, c'est-à-dire des apports en sable dans la partie sous-marine de la plage proche du rivage, dans la lutte contre l'érosion des plages sableuses. Les avantages de cette technique de rechargement, variante d'un rechargement classique directement sur la plage, résident dans un coût limité par la réduction du transport du matériel de rechargement, dans l'utilisation de matériel granulométriquement favorable et dans la proposition d'une méthode « douce », sans impact paysager, respectueuse de l'environnement. Les communes littorales souffrent en effet dans leur grande majorité de problèmes d'érosion de leurs littoraux sableux ; qu'ils soient liés aux conditions de l'évolution naturelle des milieux ou qu'ils soient induits par des aménagements antérieurs. Ceci entraîne un coût important de lutte contre ces phénomènes et des conséquences socio-économiques sur le tourisme et les activités nautiques. Dans le département de l'Hérault par exemple les enquêtes de fréquentation touristiques montrent par exemple que 85% de la demande touristique et locale se tourne vers des plages plus naturelles, dans un secteur économique porteur qui représente 1,2 M d'euros et 44 000 emplois. De plus, les méthodes de gestion qui passe par des ouvrages en dur montre actuellement ses limites face aux impacts environnementaux et aux coûts d'entretien qu'elle génère mais aussi face aux nouvelles formes de tourisme, plus soucieuses du cadre de vie. Depuis plusieurs années, les gestionnaires (Etat et

Collectivité Locales) souhaitent trouver d'autres modes de gestion de l'érosion plus respectueuses de l'environnement. En 2002, les orientations stratégiques pour la gestion de l'érosion, élaborées à la demande de la Mission Interministérielle d'Aménagement du Littoral, ont défini les secteurs sur lesquels l'artificialisation du trait de côte n'est pas envisageable au regard des enjeux. Sur ces secteurs, les rechargements de plages apparaissent comme une des solutions. Cette méthode de restauration la plus courante qui consiste à recharger la plage émergée en sable est toutefois pénalisée par la limitation des sources de sable disponibles et par des contraintes fortes pesant sur le respect des critères granulométriques. L'idée vient alors de prélever ce sédiment en mer et de recharger directement dans les petits fonds ayant une granulométrie plus compatible, mais ceci ne peut être réalisé sans étude préalable.

Ce projet s'insère et constitue le prolongement des programmes nationaux, européens ou régionaux dans lesquels sont impliqués les différents partenaires scientifiques avec lesquels il présente des articulations fortes et des complémentarités. Ce projet correspond aussi à une demande des gestionnaires du milieu littoral, impliqués eux aussi dans ce programme. Ce projet correspond à une volonté croissante des décideurs d'utiliser des solutions respectueuses de l'environnement. Il coïncide aussi avec des interrogations et des recherches actuellement en cours menées par des bureaux d'étude. Les protagonistes intervenant dans le projet appartiennent donc à des sphères d'activité généralement séparées. Les premiers intéressés à cette problématique de rechargement en sable sont les acteurs locaux gestionnaires du littoral (Mairies, SIVOM, Communautés d'Agglomérations, Conseils Généraux) et les assistants à maîtrise d'ouvrage (DRE-SMNLR). Susceptibles de réaliser la maîtrise d'ouvrage, ils ont un rôle de proposition et d'orientation (ou réorientation) du travail. De leur côté, les scientifiques offrent leurs capacités de recherche et d'innovation à travers leur connaissance du milieu naturel et de ses potentialités ainsi que leur aptitude à définir les conditions d'emploi par la mise en oeuvre de codes de calculs et par la simulation physique. Enfin, les bureaux d'études sont susceptibles de réaliser les études d'impact dans le cadre des enquêtes réglementaires mettant en pratique les normes techniques et administratives requises par ce type d'intervention.

QUELQUES ELEMENTS DE METHODOLOGIE (ET EVENTUELLES DIFFICULTES RENCONTREES)

Pour répondre aux objectifs fixés, il est envisageable de modéliser et de chiffrer de telles opérations dans des configurations opérationnelles en liaison directe avec les acteurs locaux. Ceci passe par le test, via les modèles numériques utilisés dans le programme, de différents scénarios de rechargement d'avant-côte, sous différentes conditions hydrodynamiques, réalistes économiquement, ainsi que des modélisations en modèle physique en canal à sédiment (modèle réduit à l'échelle de rechargements). Enfin, il faut envisager et évaluer l'impact de tels rechargements sur l'écosystème côtier benthique et les conséquences socio-économiques pour les acteurs du littoral qui en dépendent. Le volet biologique du projet répond ainsi à une urgence pour la gestion des zones côtières : des rechargements commencent à être réalisés en masse mais les supports pour les études d'impact sont insuffisants. Bien que le travail proposé ait un caractère générique, il est utile d'identifier par ailleurs deux sites pilotes offrant une diversité suffisante de situations pour permettre de confronter les résultats numériques à la réalité ; ainsi que pour identifier les populations faunistiques qui les caractérisent et définir un état de référence pour le Languedoc-Roussillon. Notre choix s'est porté sur deux sites qui subissent une érosion chronique, la plage de la corniche à Sète (Hérault) et celle de Leucate (Aude).

La valorisation de ce travail doit passer par la mise au point d'une méthodologie utilisable par les techniciens et décideurs : fourniture d'un modèle numérique applicable, modélisation numérique sur des sites réels et analyse des coûts, tests en canal à houle et impact de tels rechargements pour l'écosystème benthique côtier. De manière plus spécifique, il est prévu que les gestionnaires bénéficient (1) d'un outil de modélisation, (2) d'un document de référence sur l'impact biologique des rechargements d'avant-côte, (3) un document de référence et de préconisation sur les rechargements d'avant-côte. Ce projet fait aussi l'objet d'une diffusion en ligne sur le site de la Plateforme Technologique Régionale Gladys Languedoc-Roussillon (<http://www.gladys-littoral.org/>)

RESULTATS OBTENUS

Ce document final du programme présente les conclusions du travail : le volet biologie/étude d'impact sur le benthos est finalisé et peut servir de référence en la matière, les résultats des modélisations numériques les deux sites naturels du programme Sète et Leucate permettent de conclure sur l'efficacité de rechargements d'avant-côte, cette analyse est complétée par les tests de rechargements en canal à sédiment qui viennent éclairer et compléter l'approche numérique. La faisabilité et le coût de telles opérations sont par ailleurs analysés.

La synthèse des résultats peut être articulée autour de 4 points.

1. L'impact sur le benthos

On peut considérer que l'impact immédiat des rechargements sur les peuplements benthiques des petits fonds sableux est important (mortalité forte), mais qu'au regard de la faible diversité naturelle des milieux et d'une recolonisation rapide des sites, l'impact à plus long terme est relativement réduit. Le problème se pose davantage pour les espèces commerciales comme les donax (*Donax trunculus*) qui sont exploitées par les pêcheurs à pieds.

A partir de l'expérience menée dans ce travail, une proposition d'une méthodologie adaptée d'évaluation des impacts des rechargements sous-marins sur les populations benthiques est réalisée dans le document complet en annexe. Il faut s'y reporter pour en prendre connaissance dans le détail, la proposition de la méthodologie globale étant axée sur la description des travaux de dragage et de rechargement et celle des milieux, notamment l'établissement du profil biologique.

2. Les modèles numériques

Les trois modèles utilisés sont globalement convergents. Le site de Sète semble bénéficier plus favorablement des rechargements. Le rôle de rechargements par création de barres surnuméraires au large est jugé moins concluant; la plus grande efficacité revenant aux rechargements de barres externes pour des conditions de tempête classique. Le fait de créer une troisième barre surnuméraire au large n'a pas que peu d'effet sauf lors des phases de tempête exceptionnelle. Les modèles numériques restent peu performants pour reproduire la remontée de sédiment vers la plage. La prise en compte d'une meilleure discrétisation des tempêtes reste à faire, ainsi que l'extension de ces modèles vers des simulations moyen terme saisonnières.

3. Le modèle physique

A partir de l'obtention d'un profil d'équilibre et en respectant les conditions de similitudes avec le milieu naturel, on a procédé à plusieurs rechargements. La première expérience avait pour but de tester un rechargement sur le revers de la barre interne ; puis un changement d'échelle a été réalisé pour réaliser des rechargements plus au large (barre externe, fosse externe et à nouveau la zone interne) avec une meilleure discrétisation de la tempête, en particulier le tombant. Les conclusions ont été encourageantes et démontrent la bonne efficacité des rechargements d'avant-côte du point de vue expérimental du moment que l'on simule bien la phase de tombant de tempête. C'est lors de cette phase que la plage récupère ce qu'elle a perdue pendant le montant avec un bilan final qui peut s'avérer positif. En effet, l'effet de brisance et de source en sédiment pour la plage est avéré pour toutes les expériences du moment que l'on reproduit correctement la tempête.

4. L'estimation des coûts

Le rechargement de la barre externe qui semble le plus efficace nécessite des moyens de mise en œuvre plus lourds que le rechargement surnuméraire au large (estimation à 7,3 contre 3,4 EHT/m³ pour un linéaire rechargé de 3km). Pour rendre cette méthodologie attractive, il faut donc réaliser des rechargements importants en volume.

En conclusion, des avancées notables sur l'effet des rechargements d'avant-côte ont pu être obtenues grâce aux efforts de modélisations entrepris dans ce programme. L'impact sur le benthos et sa capacité de recolonisation, l'efficacité des rechargements de barre externe, l'apport de la modélisation physique en sont des éléments importants. Les résultats permettent de définir les futurs axes de recherche sur cette problématique.

IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS, REALISATIONS PRATIQUES, VALORISATION

- Implications pratiques :

- Les modèles numériques restent un outil indispensable pour la prise de décision, même si des améliorations, notamment pour l'accrétion, sont à apporter pour ces cas appliqués complexes. Le canal a lui aussi montré son intérêt alors qu'il était peu utilisé jusqu'à présent.
- Malgré les rechargements d'avant-côte simulés numériquement, l'énergie de la houle à la côte reste importante dans le système interne, ce qui amène à penser que cette solution doit aussi être accompagnée par du rechargement de plage et mettre en place des volumes de rechargement importants.
- Il s'avère nécessaire de toujours essayer de croiser les sources d'information dans la prise de décision.
- Il reste à continuer d'améliorer les modèles numériques et de réaliser des simulations sur le plus long terme avec des situations météorologiques simplifiées mais représentatives afin de se rapprocher des conditions *in situ* pour en faire un outil le plus fiable possible.

- Recommandations et limites éventuelles :

Les modèles numériques restent très sensibles à la forme du profil initial. On observe des difficultés à modéliser l'évolution de la plage émergée. Le choix de simuler uniquement une tempête de 24 h avec une hauteur de houle constante reste finalement très discutable en

comparaison de ce qui a pu être vu pour le canal lors de la phase de tombant de tempête et lors des simulations plus long terme réalisées.

Les bons résultats obtenus en canal souligne le problème des mesures en nature avant et après tempête, alors qu'il est avéré que c'est le ratio entre montant et tombant qui va définir l'impact de la tempête.

Les divergences observées entre modèles numériques et modèle physique tiennent dans la formulation même des modèles numériques et leur façon de prendre en compte les tempêtes. Cela confirme l'intérêt de la volonté de départ de vouloir confronter ces deux approches complémentaires. Un travail reste à mener pour confronter ces deux approches en faisant tourner les modèles numériques sur les observations faites en canal.

Il paraît aussi nécessaire de travailler en canal à l'échelle 1/1 pour contrôler que le changement d'échelle ne crée pas un biais dans les résultats.

- Réalisations pratiques et valorisation :

- Pour mettre en place une politique de rechargements à l'échelle régionale, il semble indispensable de créer des plans de gestions des sédiments par cellule hydro-sédimentaire en incluant les bassins versants et en recensant l'ensemble des volumes à recharger et l'ensemble des volumes disponibles.

- De nouvelles pistes doivent être suivies pour fournir des sédiments à recharger comme l'apport complémentaire de coquilles déjà présente en grand nombre sous forme de débris dans les sédiments de plage. Les résidus de l'exploitation conchylicole pourraient y trouver un débouché.

- Il serait maintenant intéressant de pouvoir bénéficier d'un rechargement d'avant-côte grandeur nature et de réaliser un suivi in situ de son efficacité.

- La problématique des rechargements pour limiter les effets de l'érosion et maintenir les infrastructures littorales en l'état ne doit pas faire oublier qu'il pourrait s'avérer moins coûteux sur le long terme pour la société de prendre la décision de reculer ces infrastructures. Cette méthode, appelée « recul stratégique », est déjà appliquée dans certains pays comme le Canada (Québec). Toutes les études à venir d'aménagement pour lutter contre l'érosion et la submersion devraient être accompagnées d'un volet d'analyse économique « coût/bénéfice » pour chacune des solutions proposées en incluant systématiquement le recul stratégique et en se basant sur des prévisions à 30 ans. Cette approche se révélera encore plus utile quand on pourra inclure les prévisions de scénarios de changements climatiques à venir, qui affecteront sûrement la dynamique sédimentaire en accentuant encore les phénomènes d'aléas sur le littoral.

PARTENARIATS MIS EN PLACE, PROJETS, ENVISAGES

Le partenariat a été mis en oeuvre au sein même du projet qui regroupe des scientifiques, les Collectivités Locales et des bureaux d'étude à l'échelle du Languedoc-Roussillon.

LISTE DES OPERATIONS DE VALORISATION ISSUES DU CONTRAT (ARTICLES DE VALORISATION, PARTICIPATIONS A DES COLLOQUES, ENSEIGNEMENT ET FORMATION, COMMUNICATION, EXPERTISES...)

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	
Publications scientifiques parues	8
Publications scientifiques à paraître	1
Publications scientifiques prévues	
COLLOQUES	
Participations passées à des colloques	24
Participations futures à des colloques	
THESES	
Thèses passées	1
Thèses en cours	1
ARTICLES DE VALORISATION-VULGARISATION	
Articles de valorisation parus	2
Articles de valorisation à paraître	
Articles de valorisation prévus	
AUTRES ACTIONS VERS LES MEDIAS	
Actions vers les médias (interviews...) effectuées	3
Actions vers les médias prévues	
ENSEIGNEMENT - FORMATION	
Enseignements/formations dispensés	3
Enseignements/formations prévus	
EXPERTISES	
Expertises menées	2
Expertises en cours	
Expertises prévues	
METHODOLOGIES (GUIDES...)	
méthodologies produites	3
méthodologies en cours d'élaboration	
méthodologies prévues	
AUTRES	
Précisez...	

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PARUES

- *Publications portant sur la compréhension du milieu naturel des sites du programme*

PUBLICATIONS DE RANG A (ACL)

Jimenez, J.A., Ciavola, P., Balouin, Y., Armaroli, C., Bosom, E, and Gervais, M.
Geomorphologic coastal vulnerability to storms in microtidal fetch-limited

- environments application to NW Mediterranean and N Adriatic Seas, *Journal of Coastal Research*, SI 56.
- Hurther, D., Michallet, H. & Gondan, X. (2007). Turbulent measurements in the surf zone suspension. *J. Coastal Res.*, in press.
- Michallet, H., Grasso, F. & Barthelemy, E. (2007). Long waves and beach evolution profiles. *J. Coastal Res.*, SI 50, 221-225.
- Ferrer, P., Benabdellouahed, M., Certain, R., Tessier, B., Barusseau, J.P. & Bouchette, F. (soumis). *The Late Holocene infill of the Thau lagoon (Western Gulf of Lions, Mediterranean Sea, France). A record of coastal barrier dynamics under climate and eustatic forcing.* accepté au Bulletin de la Société Géologique de France.

PUBLICATIONS AVEC COMITE DE LECTURE (ACLN)

- Rey, V., Certain, R., Drevrard, D., Meuret, A. et Piazzola, J., 2006. Mesures de houles partiellement stationnaires en zones côtière et littorale. *Mécanique & Industries*, 7, 201-207.

COMMUNICATIONS AUX CONGRES INTERNATIONAUX AVEC ACTES (ACTI)

- Barthelemy, E., Certain, R., Grasso, F., Michallet, H. Experiments on cross-shore equilibrium beach profiles and beach morphology, *Inter. Conf. ICCE 2008*, Hambourg, (September, 2008)
- Certain, R. & Barusseau, J. P., 2006. Conceptual modelling of straight sand bars morphodynamics for a microtidal beach (Gulf of Lions, France), *The 30th International Conference of Coastal Engineering*, San Diego, USA, 3rd-8th September 2006.
- Ferrer, P., Certain, R., Barusseau, J.-P., et Gervais, M. (accepté). *Conceptual modelling of a double crescentic barred coast (Leucate-Plage, France)*. Coastal Dynamics, Tokyo, Japon (7-11 Septembre 2009).

COMMUNICATIONS AUX CONGRES NATIONAUX AVEC ACTES (ACTN)

- Ferrer, P., Rey, V., Certain, R., Adloff, F., et Meulé, S., 2006. Les ondes infragravitaires et leur rôle éventuel dans la formation de croissants de plage : Cas de la plage de Sète, *IXèmes Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil*, Brest 2006.
- Ferrer, P., Bujan, N., Certain, R., et Leredde, Y., 2008. *Caractérisation hydrodynamique D'un littoral à barres festonnées du golfe du Lion (Leucate, France) : mesures in-situ et modélisation.* X^{èmes} Journées Nationales Génie Côtier-Génie Civil, Sophia-Antipolis (14-16 Octobre 2008).

COMMUNICATIONS AUX CONGRES INT. ET NAT. SANS ACTES (COM)

- Ferrer, P., Tessier, B., Benabdellouahed, M., Certain, R., and Barusseau, J-P., 2007. Holocene sandy barrier evolution as indicated through lagoonal sedimentary infill. The example of the Thau lagoon-and-barrier system (western Gulf of Lions, Mediterranean sea, France), *Conference Internationale sur l'Etude de la Méditerranée*, Istanbul, Turquie, 9-13 Avril.
- Samat, O., Gouaud, F., Certain, R., Lambert, A., Meulé, S., Sabatier, F., 2007. Hydrodynamics studies in front of a seawall (Véran site, Gulf of Lions, Mediterranean coast), Coastal Structures international Conferences, Venice, Italy, 2-4 July 2007.

- Ferrer, P., Adloff, F., Certain, R., Meulé, S., Bouchette, F. et Leredde, Y. Hydrodynamique à l'échelle événementielle d'un système de barres festonnées dans le golfe du lion (Leucate-Plage, Aude). *11ème Congrès Français de Sédimentologie, Caen, octobre 2007*.
- Ferrer, P., Cance, L., Certain, R., Barusseau, J-P. Morphodynamique pluriannuelle d'un système de barres d'avant-côte festonnées en milieu microtidal (sud du golfe du Lion). *11ème Congrès Français de Sédimentologie, Caen, octobre 2007*.
- Grasso, F., Michallet, H. & Barthelemy, E. (2007). Infragravity waves in mobile-bed laboratory experiments. *Proc. ASCE Coastal Sediments 07*, New Orleans.
- Ferrer, P., Certain, R., Gervais, M. & Barusseau, J.P., (soumis). *Modèle morphodynamique conceptuel d'un système double de barres festonnées en milieu microtidal (Leucate-plage, Aude)*. 12ème Congrès Français de Sédimentologie, Rennes (27-29 Octobre 2009).
- C. Godon, N. Robin, N. Aleman, M. Gervais, R. Certain, S. Meulé, F. Bouchette, Y. Balouin, E. Brambilla Hydrodynamique d'une plage à barre en milieu microtidal à l'aide d'ADCP. 12^{ème} Congrès des Sedimentologues Français (ASF), 25-31 Octobre 2009, Rennes (soumis).
- Brambilla, E., Bouchette, F., Certain, R., Ferrer, P., Robin, N. & G. Sylaios, 2009. *Observations of sediment resuspension and transport in the nearshore zone, Gulf of Lion, France*. EGU, Vienne, Autriche (19-24 Avril 2009).
- J. Thiébot, N. Robin, R. Garnier, R. Certain, D. Idier, D. Calvette, A. Falquès, F. Levoy. Morphological response of a double nearshore bar system under oblique waves, EGU Vienna Austria, 19-24 April 2009, session HS9.1/GM9.2 Coasts and Estuaries

➤ Publications spécifiques au test de rechargement

PUBLICATIONS DE RANG A (ACL)

- GRASSO, F., MICHALLET, H., CERTAIN, R. and BARTHÉLEMY, E., 2009. Experimental flume simulation of sandbar dynamics. *Journal of Coastal Research*, SI 56, 54-58.
- Grasso, F., Michallet, H., Barthélemy, E. and Certain, R., 2009. Physical modelling of intermediate cross-shore beach morphology: transients and equilibrium states. *J. Geophys. Res.*, accepté.
- Larroude, P., 2007. Seasonal morphological modelisation for nourishment strategies on Mediterranean beaches. *Marine Pollution Bulletin*, 57, 47-52

COMMUNICATIONS AUX CONGRES INTERNATIONAUX AVEC ACTES (ACTI)

- Grasso, F., Michallet, H. and Barthélemy, E., 2009. Experimental simulations of shoreface nourishment under storm conditions. *Coastal Dynamics*, Tokyo, Japan, 7-11 Sept.
- GRASSO, F., MICHALLET, H., CERTAIN, R. and BARTHÉLEMY, E., 2009. Experimental simulation of sandbar dynamics. *10th International Coastal Symposium*, Lisbon, Portugal.

COMMUNICATIONS AUX CONGRES NATIONAUX AVEC ACTES (ACTN)

- Certain, R., Grasso, F., Spielman, K., Astruc, D., Larroude, P., Michallet, H., Barthélemy, E., Sabatier, F. and Barusseau, J.-P., 2008. Etude de faisabilité par modélisation

numérique et canal à sédiment de rechargements sédimentaires sableux d'avant-côte en milieu microtidal, une nouvelle méthode de lutte contre l'érosion côtière. *Xèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier*, Sophia-Antipolis, 14-16 octobre.

Grasso, F., Barthélemy, E., Certain, R. and Michallet, H., 2008. Etudes expérimentales des profils cross-shore de plages sableuses. *Xèmes Journées Nationales Génie Civil – Génie Côtier*, Sophia-Antipolis, 14-16 octobre.

COMMUNICATIONS AUX CONGRÈS INT. ET NAT. SANS ACTES (COM)

- Certain, R., Astruc, D., Spielman, K., Larroudé, P., Michallet, H., Grasso, F., Barthélemy, E., Sabatier, F., Barusseau J-P. Etude de faisabilité par modélisation numérique et canal à sédiment de rechargements sédimentaires sableux d'avant-côte en milieu microtidal, une nouvelle méthode de lutte contre l'érosion côtière. *11ème Congrès Français de Sédimentologie, Caen, octobre 2007*.
- Larroudé, P., Long-term simulation with 2DH and 3D models for nourishment on Mediterranean beaches, *5th IAHR Symposium on River, Coastal and Estuarine Morphodynamics*, University of Twente, The Netherlands, (17-21 SEPTEMBER 2007)
- Larroudé, P., Simulations morphodynamiques long terme pour la protection du littoral, *18ème Congrès Français de Mécanique, Grenoble, (27-31 août 2007)*
- Philippe Larroudé, Yearly simulation with a complet non linear 2DH model for nourishment strategies on Mediterranean beaches, Inter. Conf. COASTAL STRUCTURES, Venice, (July 2-4, 2007).
- Philippe Larroudé, Jean-Paul Barusseau and Raphaël Certain, Methodology of Seasonal morphological modelisation for nourishment strategies on a Mediterranean beach, Inter. Conf. EMECS 7, Caen, (2006)

COMMUNICATIONS PAR AFFICHE (AFF)

Alonso B, Durán R, Ercilla G, Casas D, Bernabeu A, Estrada, F, Ferran M, Nuez M, Serra J, Valois X, Lamberti, A, Martinelli L, Merli D, Piemontese M, Aminti P, L, Barbieri G, Battistini A, Cappiotti L, Eliso C, Mori E, Tecchi M G, Petaccia, A, Greco A, Maistri A, Sammarco, P, Camilletti S, Certain R, Kosovinos, N, Koutitas C, Hrissanthou V, Angelidis P, Andredaki M, Georgoulas, A, Samaras A, Valsamidis A, Evangelos K, Theofanis K, Nikolaos, K. Managements of sand deposits intercepted by coastal and fluvial infrastructures in the Mediterranean areas. *11ème Congrès Français de Sédimentologie, Caen, octobre 2007*.

L'effort de communication a aussi porté sur la diffusion de l'information dans des articles dans la presse locale et de communication extérieures de l'UPVD.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PRÉVUES

Spielmann, K. Certain, R. Astruc D. and Barusseau, J.-P. Evaluation of bar nourishment strategies for wave-dominated beach protection using a 2DV process-based model, en révision *Coastal Engineering*.

RESUMES

En français

Ce document expose les travaux finaux obtenus dans ce projet de recherche LITEAU II qui vise à étudier la possibilité d'utiliser les rechargements sédimentaires d'avant-côte, c'est-à-dire des apports en sable dans la partie sous-marine de la plage proche du rivage, dans la lutte contre l'érosion des plages sableuses. Les avantages de cette technique de rechargement, variante d'un rechargement classique directement sur la plage, résident dans un coût limité par la réduction du transport du matériel de rechargement, dans l'utilisation de matériel granulométriquement favorable et dans la proposition d'une méthode « douce », sans impact paysager, respectueuse de l'environnement. Il est envisagé dans ce programme de considérer ce que pourraient être des phases opérationnelles en liaison directe avec les acteurs locaux. Pour cela, en plus de la proposition de fournir une expertise et des outils de modélisation numérique utilisables par les techniciens et gestionnaires sur différents sites, des simulations de rechargements en canal à houle et sédiment (modèle réduit) sont réalisés afin d'en étudier la stabilité, cela pour des coûts peu élevés. Il semble aussi primordial d'examiner l'impact écologique (et socio-économique pour les acteurs du littoral) de tels rechargements dans les zones de rechargement sur les petits fonds. Ce document présente les résultats finaux du travail :

Le volet biologie/étude d'impact sur le benthos démontre que l'impact immédiat des rechargements sur les peuplements benthiques des petits fonds sableux est important (mortalité forte), mais qu'au regard de la faible diversité naturelle des milieux et d'une recolonisation rapide des sites, l'impact à plus long terme est relativement réduit. Le rapport spécifique élaboré pourra servir de référence en la matière. Les modélisations numériques sur les deux sites naturels du programme Sète et Leucate montre que les rechargements réalisés pour renforcer les barres externes sont les plus efficaces. Les expériences de rechargement en canal à sédiment illustre la bonne efficacité des rechargements d'avant-côte si les conditions de forçage ne sont pas extrêmes. Une analyse de faisabilité technique et économique a été réalisée et montre que les rechargements de barre externe reste plus coûteux que des rechargements réalisés plus au large.

Ainsi, ce projet constitue un des outils visant à orienter le choix des aménageurs du littoral parmi un ensemble de solutions possibles vers une solution douce, économiquement compétitive, et ayant un impact paysager minimal.

MOTS CLES : RECHARGEMENT SABLEUX D'AVANT-COTE, MODELISATION ET SIMULATION NUMERIQUE, MODELE PHYSIQUE EN CANAL A SEDIMENTS, ETUDE D'IMPACT SUR LE BENTHOS, DOCUMENT DE REFERENCE ET DE PRECONISATION A L'USAGE DES GESTIONNAIRES

In English

This document explains the final results obtain in this LITEAU II project. The aim of this work is to study the possibility to use shoreface nourishment in the fight against coastal erosion. The advantages of this technique, slightly different from beach nourishment, are to reduce the travel cost of the nourishment, to use fine mean-size sediment usually inefficient on the beach and to provide an environmental friendly technology. In this program, we are thinking about what can be real test in dialogue with end-users. For this, we propose to give numerical tools applicable on different sites of the program and to use also sediment flume experiments to test shoreface scenarios. Moreover, it seems now necessary to study the impact on the benthic biological population of underwater nourishment and the taotal cost of these kind of shoreface nourishments.

It is shown that the impact on the benthic fauna is very strong but as the biological diversity on the sites and their capacity of travel, the long term impact is week. A specific report is made to explain how elaborate th e better imapct studies in the future. The numerical modelling on the two sites of the program, Sète and Leucate, illustrates that the outer bar nourishment is more efficient. Physical modelling in flume show the good results of shoreface nourishment if hydrodynamics conditions are not too strong. The technical and budget study demonstrate that the outer bar nourishment is however more expensive than offshore bars nourishment.

Finally, this project will constitute one tool for the end-users decisions in a panel of environmental friendly and economical competitive solutions.

KEY WORDS : SHOREFACE NOURISHMENT, NUMERICAL MODELING, SEDIMENT FLUME MODELING, IMPACT STUDY ON BENTHIC FAUNA, SYNTHESIS REPORT FOR END-USERS

RAPPORT SCIENTIFIQUE

LES RECHARGEMENTS SEDIMENTAIRES D'AVANT-COTE: UNE NOUVELLE METHODE DE LUTTE CONTRE L'EROSION COTIERE

PROGRAMME LITEAU II

Responsable scientifique du projet : Raphaël Certain, IMAGES UPVD

Partenaires scientifiques bénéficiaires : Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), Laboratoire des Ecoulements Géophysiques & Industriels (LEGI), Observatoire Océanologique de Banyuls, SOGREAH Ingénierie, CREOCEAN, Direction Régionale Languedoc-Roussillon de l'Équipement (DRE) (anciennement Service Maritime et de Navigation du Languedoc-Roussillon (SMNLR)), Conseil Général de l'Hérault (CG 34), SIVOM Leucate/Barcarès, Communauté d'Agglomération du Bassin de Thau (CABT)



1- Descriptif du projet, contexte scientifique, objectifs initiaux et résultats scientifiques attendus

1.1. Descriptif du projet

Le présent projet de recherche vise à étudier la possibilité d'utiliser les rechargements sédimentaires d'avant-côte dans la lutte contre l'érosion des plages sableuses. Les avantages de cette technique de rechargement sous-marin résident dans un coût limité par la réduction du transport du matériel de rechargement, dans l'utilisation de matériel granulométriquement favorable et dans la proposition d'une méthode « douce », sans impact paysager, respectueuse de l'environnement. Il est maintenant envisageable de modéliser et de chiffrer de telles opérations dans des configurations opérationnelles en liaison directe avec les acteurs locaux. En plus de fournir une expertise et un outil de modélisation numérique utilisable par les techniciens et gestionnaires sur différents sites, il est souhaitable de modéliser en canal à houle et sédiment ce type de rechargement et d'en étudier la stabilité, cela pour des coûts peu élevés. Il semble aussi primordial d'examiner maintenant l'impact écologique (et socio-économique pour les acteurs du littoral) de tels rechargements dans les zones de prélèvement éventuel et dans les zones de rechargement sur les petits fonds. Le volet biologique du projet répond ainsi à une urgence pour la gestion des zones côtières : des rechargements commencent à être réalisés en masse mais les supports pour les études d'impact sont insuffisants.

Ce projet correspond à plusieurs axes de recherche spécifique du Ministère de l'Ecologie, du Développement et de l'Aménagement durables : 1. Restauration des milieux altérés, en particulier par la proposition de mesures compensatoires pour la gestion du trait de côte. Dans une moindre mesure cette proposition entre aussi dans 2. Directive-Cadre Européenne sur l'Eau en contribuant à définir des indicateurs biologiques pour les petits fonds sableux et dans 3. La Gestion Intégrée des Zones Côtières en proposant des réponses durables intégrant les acteurs locaux.

1.2. Contexte scientifique

Ce projet constitue le prolongement et l'application des programmes nationaux, européens ou régionaux dans lesquels sont impliqués les différents partenaires. Le présent projet présente des articulations fortes et des complémentarités avec les programmes suivants:

* GESA BEACHMED-e (Programme Européen InterReg III C Sud –opération cadre régional-, www.beachmed.it). Le CG 34 est le coordinateur français de ce programme européen. Les thématiques développées dans ce programme sont proches de celles détaillées dans ce programme LITEAU II. Certains des partenaires cette proposition sont aussi regroupés dans la demande BEACHMED-e. Les efforts menés et les résultats espérés dans BEACHMED-e pourront alimenter et compléter la réflexion menée dans LITEAU II, et inversement.

- * GDR Marges Chantier Golfe du Lion. L'UPVD travaille sur la mise en place des corps sédimentaires depuis le dernier haut niveau marin.
- * PNEC phase II. L'IMFT participe à l'Action Transversale « Conditions de remaniement des sédiments naturels et flux d'érosion associés » coordonnée par P. Le Hir (IFREMER).
- * IDAO projet « Hydrodynamique dans la zone de déferlement ». L'IMFT, le LEGEM et le LEGI participent au projet par H. Michallet (LEGI).
- * ENCORA et RFRC réseaux européen et français de recherche côtière
- * PEA ECORS soutenu par le SHOM (Programme Relief de l'INSU). De nombreux partenaires de ce projet proposent dans ce programme d'expérimenter de nombreux sites dans le Languedoc-Roussillon afin d'alimenter les nouvelles générations de modèles au niveau national.
- * ANR VULSACO coordonnée par le BRGM qui proposent de valider des modèles d'évolution long terme d'évolution du trait de côte.
- * Les participants bénéficient aussi du soutien logistique et technologique de la Plateforme Technologique Régionale GLADYS (Groupe Languedoc-Roussillon d'étude de l'hydrodynamique et de la DYnamique Sédimentaire littorale) dont l'UPVD et l'UM2 sont les membres fondateurs et qui bénéficient de l'aide de la Région Languedoc-Roussillon. En outre le Ministère de la recherche soutien aussi ce projet avec l'attribution de deux bourses doctorales à IMAGES et au LEGI.

Ce projet LITEAU II représente donc la passerelle entre les études fondamentales amont du milieu littoral et les applications possibles des connaissances recueillies au service des gestionnaires.

Ce projet correspond également à une demande des gestionnaires du milieu littoral, impliqués eux aussi dans ce programme. Depuis plus d'une décennie, l'accent a été mis au niveau national sur l'étude des barres sédimentaires, qui sont des corps sédimentaires très répandus le long des littoraux et qui constituent une part importante du budget sédimentaire d'une plage. C'était le sujet de l'ART 7 du PNEC, « Hydrodynamique sédimentaire » jusqu'en 2003, ainsi que du programme PATOM et LITEAU I. Le projet qui est présenté ici est destiné à accompagner et poursuivre ces programmes de recherche, en cherchant à appliquer une partie des résultats obtenus. Ce projet correspond à une volonté croissante des décideurs d'utiliser des solutions respectueuses de l'environnement (dans le département de l'Hérault par exemple les enquêtes de fréquentation touristiques montrent que 85% de la demande touristique et locale se tourne vers des plages plus naturelles, dans un secteur économique porteur qui représente 1,2 M d'euros et 44 000 emplois). Il coïncide aussi avec des interrogations et des recherches actuellement en cours menées par des bureaux d'étude, et des programmes de recherche au niveau européen.

Un état de l'art exhaustif de la question regroupant l'ensemble des références bibliographiques sur les rechargements sédimentaires sableux d'avant-côte a été réalisé dans le document de proposition en réponse à l'appel d'offre. Il est possible de s'y référer pour tout complément d'information et aperçu général de la question au niveau international.

1.3. Objectifs initiaux et résultats scientifiques attendus

Les communes littorales souffrent dans leur grande majorité de problèmes d'érosion de leurs littoraux sableux ; qu'ils soient liés aux conditions de l'évolution naturelle des milieux ou qu'ils soient induits par des aménagements antérieurs. Ceci entraîne un coût important de lutte contre ces phénomènes et des conséquences socio-économiques sur le tourisme et les activités nautiques. De plus, les méthodes de gestion qui passent par des ouvrages en dur montrent actuellement leurs limites face aux impacts environnementaux et aux coûts d'entretien qu'elle génèrent mais aussi face aux nouvelles formes de tourisme, plus soucieuses du cadre de vie. Depuis plusieurs années, les gestionnaires (Etat et Collectivité Locales) souhaitent trouver d'autres modes de gestion de l'érosion plus respectueuses de l'environnement. En 2002, les orientations stratégiques pour la gestion de l'érosion, élaborées à la demande de la Mission Interministérielle d'Aménagement du Littoral, ont défini les secteurs sur lesquelles l'artificialisation du trait de côte n'est pas envisageable au regard des enjeux. Sur ces secteurs notamment, les rechargements de plages apparaissent comme une des solutions.

Cette méthode de restauration la plus courante qui consiste à recharger la plage en sable est toutefois pénalisée par la limitation des sources de sable disponibles et par des contraintes fortes pesant sur le respect des critères granulométriques. L'idée vient alors de prélever ce sédiment en mer et de recharger directement dans les petits fonds ayant une granulométrie plus compatible ; mais ceci ne peut être réalisé sans étude préalable. C'est l'objectif de ce travail.

La valorisation de ce travail doit passer par la mise au point d'une méthodologie utilisable par les techniciens et décideurs : fourniture d'un modèle numérique applicable, modélisation numérique sur des sites réels, tests en canal à houle et impact de tels rechargements pour l'écosystème benthique côtier.

Ainsi, ce projet peut constituer un des outils visant à orienter le choix des aménageurs du littoral parmi un ensemble de solutions possibles vers une solution douce, économiquement compétitive, et ayant un impact paysager minimal. L'intérêt de ce travail pour les gestionnaires est illustré par leur volonté de s'impliquer dans ce programme. Plusieurs projets sont actuellement en cours d'étude et de définition. Les partenaires locaux de ce projet (DRE-SMNLR, Conseil Général de l'Hérault, Communauté d'Agglomérations du Bassin de Thau, SIVOM Leucate Barcarès) sont donc très intéressés par ce projet qui permettra à la fois:

- de mieux apprécier les impacts des rechargements prévus
- de mieux adapter le type de rechargement au site
- d'aider les maîtres d'ouvrages dans leur choix

De manière plus spécifique, il est prévu que les gestionnaires bénéficient (1) d'un **outil de modélisation**, (2) d'un **document de référence sur l'impact biologique des rechargements d'avant-côte**, (3) d'un **document de référence et de préconisation sur les rechargements d'avant-côte**.

2- Hypothèses et dispositif méthodologique

Le présent projet de recherche vise à étudier la possibilité d'utiliser les rechargements sédimentaires d'avant-côte dans la lutte contre l'érosion des plages sableuses. C'est la suite d'une longue réflexion menée par les participants, à la demande des gestionnaires locaux. Où trouver du sable ? Comment recharger au mieux ? Quelle doit être la position du rechargement sur le profil de plage sous-marin ?

Il semble que les rechargements d'avant-côte les plus efficaces et les plus avantageux financièrement soient ceux réalisés sur la barre externe ou en création d'une barre surnuméraire plus au large (conclusions du programme LITEAU I). Le travail consiste maintenant à obtenir un outil capable de modéliser ces scénarios dans différents environnements réels. Pour y répondre, il faut imaginer différents scénarios envisageables et réalistes économiquement et les tester via les modèles numériques utilisés dans le programme et les modélisations en modèle physique en canal à sédiment. Un certain nombre de scénarios sont donc testés sous différentes conditions hydrodynamiques. Enfin, il faut envisager et évaluer l'impact sur l'écosystème côtier benthique de tels rechargements. Bien que le travail proposé ait un caractère générique, il est utile d'identifier deux sites pilotes offrant une diversité suffisante de situations pour permettre de confronter les résultats numériques à la réalité ; ainsi que pour identifier les populations faunistiques qui les caractérisent.

Notre choix s'est porté sur deux sites qui subissent une érosion chronique, la plage de la Corniche à Sète (Hérault) et celle de Leucate (Aude). Le premier parce qu'il représente une forte valeur économique et a constitué un site du PNEC et de LITEAU, le second, parce qu'il représente un cas plus fréquent, dans le golfe du Lion mais également ailleurs (Côte Aquitaine ; Lafon et al., 2001), de disposition des barres d'avant-côte, celui des systèmes de barres festonnées. Ces côtes sont également soumises à des processus d'érosion chronique ou circonstancielle et les décideurs souhaitent passer à un système de protection évitant les solutions "dures" jusque là utilisées. Ces deux sites sont donc complémentaires car ils permettent de rassembler l'ensemble des cas (en typologie et en nombre de barres) rencontrés sur le littoral languedo-roussillonnais. Ils permettront donc de tester l'ensemble des scénarios. Ils présentent en outre l'intérêt d'être suivis depuis plus de 10 ans par l'Université de Perpignan Via Domitia.

La méthodologie suivie peut se décliner en trois composantes : (1) la méthodologie de terrain pour laquelle le travail est sur l'exploitation de solides bases de données en ce qui concerne la dynamique sédimentaire. Pour décrire l'état des communautés benthiques l'ensemble des travaux réalisés dans le domaine sera synthétisé. Un inventaire faunistique spécifique sera mené par ailleurs sur les deux sites atelier à partir de prélèvements. (2) La méthodologie de modélisation en canal et numérique, dans laquelle plusieurs types de modèles sont utilisables pour la modélisation moyen-terme. Le système hydro-informatique Télémac, d'une part, utilisé par le LEGI, et, d'autre part, des modèles développés par l'IMFT. Les caractéristiques de ces modèles sont présentées dans le document de réponse à l'appel à proposition. (3) l'approche de faisabilité économique des scénarios retenus.

3- Organisation interne et coordination

L'équipe est composée de divers laboratoires de recherche spécialisés dans les thématiques abordées dans le programme ainsi que par des acteurs locaux gestionnaires du littoral (Mairies, SIVOM, Communautés d'Agglomérations, Conseils Généraux), des assistants à maîtrise d'ouvrage et organismes de contrôle (DRE-SMNLR) et des bureaux d'études (tabl. 1).

Membres	Interlocuteurs	contacts
Université de Perpignan, Laboratoire d'Etude des Géo-Environnements Marins (LEGEM)	Raphaël CERTAIN, Enseignant-Cherch. (M.C.), Jean-Paul BARUSSEAU, Enseignant-Cherch. (Prof. Em.)	certain@univ-perp.fr; brs@univ-perp.fr
Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT)	Dominique ASTRUC, Enseignant-Chercheur (M.C.)	astruc@imft.fr
Laboratoire des Ecoulements Géophysiques & Industriels (LEGI)	Philippe LARROUDE, Enseignant-Chercheur (M.C.)	Philippe.Larroude@hmg.inpg.fr
SOGREAH Ingénierie	Jacques VIGUIER, Ingénieur-Chercheur	jacques.viguiet@sogreah.fr
CREOCEAN	Dutrieux, Ingénieur-Chercheur	dutrieux@creocean.fr
Service Maritime et de Navigation du Languedoc- Roussillon (SMNLR)	Pierre-Yves Valantin, Ingénieur Flore Lafaye de Micheaux, Ingénieur	Pierre-Yves.Valantin@equipement.gouv.fr flore.lafaye-de-micheaux@equipement.gouv.fr
Observatoire Océanologique de Banyuls	Jean-Michel Amouroux, Chercheur	amouroux@obs-banyuls.fr
Conseil Général de l'Hérault (CG 34)	M. Philippe Carbonnel, Ingénieur	p-carbonnel@cg34.fr
SIVOM Leucate/Barcarès	Mme. Cros, chargée d'étude	04 68 66 11 64
Communauté d'Agglomération du Bassin de Thau (CABT)	Mme Dominique Salasse, chargée d'étude	04 99 57 23 03

Tableau 1 : Organismes et responsables participants au projet.

Les protagonistes intervenant dans le projet appartiennent donc à des sphères d'activité généralement séparées. Les premiers intéressés à cette problématique de rechargement en sable sont les acteurs locaux gestionnaires du littoral (Mairies, SIVOM, Communautés d'Agglomérations, Conseils Généraux) et les assistants à maîtrise d'ouvrage (DRE-SMNLR). Susceptibles de réaliser la maîtrise d'ouvrage, ils ont un rôle de proposition et d'orientation (ou réorientation) du travail en cours. De leur côté, les scientifiques offrent leurs capacités de recherche et d'innovation à travers leur connaissance du milieu naturel et de ses potentialités ainsi que leur aptitude à définir les conditions d'emploi par la mise en oeuvre de codes de calculs et par la simulation physique. Enfin, les bureaux d'études sont susceptibles de réaliser les études d'impact dans le cadre des enquêtes réglementaires mettant en pratique les normes techniques et administratives requises par ce type d'intervention. Lors de cette démarche, ils pourront bénéficier du soutien de la Cellule Qualité des Eaux Littorales Languedoc-Roussillon au sein de la DRE qui est chargée de veiller à la protection et la préservation du milieu marin dans le cadre de l'instruction de ces enquêtes réglementaires.

La coordination de ces trois grands groupes d'opérateurs du projet est assurée par la tenue de réunions de travail régulières et d'un comité de suivi (SIVOM Leucate/Barcarès, Comm. Agglo. de Sète, Conseil Général 34, DRE) dont l'implication principale consiste à commenter et réorienter les résultats des sorties de modèles dans la seconde partie du projet. La totalité des

opérations réalisées est soumise au contrôle des gestionnaires utilisateurs finaux des procédés. Ce contrôle a pour objet la mise en adéquation des informations recueillies et des protocoles expérimentaux utilisés avec les contraintes de la réalité opérationnelle de leur mise en oeuvre.

4- Déroulement des travaux

Nous avons proposé d'articuler le projet autour de 7 tâches distinctes :

- Tâche A : Revue bibliographique complète sur la thématique de l'impact de rechargement en sable sur l'écologie benthique de la zone littorale et inventaire faunistique récent sur les deux sites du programme (état de référence) (CREOCEAN et Observatoire Océanologique de Banyuls)

- Tâche B : Modélisation numérique des sites naturels pilotes (LEGI/IMFT/IMAGES)

- Tâche C : Mise au point d'une l'interface de modélisation (IMFT)

- Tâche D : Modélisation physique en canal (LEGI/ IMAGES): tests de scénarios de rechargement dans des conditions de similitude avec le milieu naturel.

- Tâche E : Estimation des coûts (Sogreah)

- Tâche F : Contrôle et suivi du projet (SIVOM de Leucate/Barcarès, Communauté d'Agglomération de Sète, Conseil Général 34, DRE)

- Tâche G : Analyse des résultats. Synthèse. Recommandations. Eléments pour l'élaboration d'un guide de recommandations

Pour le détail de ce qui est prévu dans chacune de ces tâches se reporter au document de réponse à l'Appel à Projet. Le tableau 2 résume le planning des tâches à réaliser, et décrit les interventions de chaque partenaire par semestre. Le projet couvre 3 années à partir de janvier 2006.

Réunions :

Le projet fait l'objet de 2 réunions de travail (RT1 et RT2) entre l'ensemble des partenaires du projet, auxquelles s'ajouteront des réunions plus informelles entre certains d'entre eux sur des aspects précis des différentes tâches. Ainsi différentes réunions ont été organisées depuis le début du projet soit en regroupant tous les partenaires scientifiques, soit en associant les partenaires par thèmes de recherche avec la tenue de réunions spécifiques sur la modélisation numérique par exemple ou sur le volet biologique. La bonne coordination du projet repose, en outre, sur des échanges permanents entre les partenaires via Internet, ainsi que sur la mobilité des doctorants

impliqués dans le projet, qui seront amenés à travailler avec d'autres équipes que celles de leurs laboratoires de rattachement.

Rapports :

Le projet fait l'objet de deux documents : Un rapport commun à mi-parcours dit rapport intermédiaire (en accès libre depuis le semestre 3); Un rapport commun de fin de projet dit rapport final (ce rapport, en fin semestre 6).

	Nombre de Semestres après le démarrage du projet											
	1		2		3		4		5		6	
	(1 ^{ère} année)		(2 ^{ème} année)		(2 ^{ème} année)		(2 ^{ème} année)		(3 ^{ème} année)		(3 ^{ème} année)	
Tâche A												
Revue Bibliographique	Creocean	Creocean							Creocean	Creocean		
Campagne de terrain			Banyuls	Banyuls					Banyuls	Banyuls		
Tâche B												
Modélisation des sites pilotes			LEGI IMFT LEG.	LEGI IMFT LEG.	LEGI IMFT LEG.	LEGI IMFT LEG.	LEGI IMFT LEG.	LEGI IMFT LEG.				
Tâche C												
Mise au point interface			IMFT	IMFT	IMFT	IMFT						
Tâche D												
Définition de l'état de référence	LEGI LEG.	LEGI LEG.										
Expériences de rechargement et comparaisons numériques,			LEGI LEG.	LEGI	LEGI	LEGI	LEGI	LEGI	LEGI			
TÂCHE E												
Evaluation des coûts									Sog.	Sog.		
Tâche F (comité de suivi)	Tous les partenaires lors de RT1 et RT2											
Tâche G												
Synthèse et Recommandations												Tous les partenaires
Réunions					RT 1							RT 2

Tableau 2 : Calendrier d'exécution

5- Résultats, apports et limites

Pour une plus grande clarté de l'exposé, le choix a été fait de détailler l'ensemble des travaux de manière synthétique par tâches.

Tâche A : Revue bibliographique complète sur la thématique de l'impact de rechargement en sable sur l'écologie benthique de la zone littorale et inventaire faunistique récent sur les deux sites du programme (état de référence) (CREOCEAN et Observatoire Océanologique de Banyuls)

Ce travail a abouti à la réalisation d'un **document de synthèse** produit par les deux partenaires concernés en liaison avec la coordination du projet (**Evaluation des impacts des dragages et de l'alimentation artificielle des barres d'avant-côte, 158 p.**, fourni en annexe). Ce travail a été réalisé en interaction avec les instances pour lesquelles il est destiné (DRE, anciennement Cellule de l'Eau du SMNLR).

Nous présenterons donc ici une synthèse courte de ce travail dans la mesure où le document de synthèse complet produit est joint en annexe.

Le travail a consisté, comme fixé dans les objectifs, à réaliser une synthèse bibliographique exhaustive sur les opérations de dragages et rechargement d'avant-côte, ainsi que les impacts environnementaux associés, en focalisant sur les écosystèmes benthiques. Le document actuel précise par ailleurs dans le détail les dispositions récentes en terme de réalisation d'étude d'impact pour les écosystèmes benthiques, ainsi que leurs limites. Les sites pilotes du programme, représentatifs de la majorité des plages du Languedoc-Roussillon, Leucate et le lido de Sète à Marseillan, ont fait l'objet de campagnes de terrain et d'une analyse détaillée du benthos en présence afin de décrire l'état initial du milieu. En fonction des connaissances sur sa sensibilité, des conclusions ont pu être apportées quand à l'impact de rechargements sous-marins.

Il semble que le peuplement de ces deux sites est globalement pauvre (pas d'espèces patrimoniales) et peu sensible en comparaison d'autres écosystèmes, même si cela reste un environnement remarquable et caractéristique du Languedoc-Roussillon. Les espèces présentes incluant les espèces consommables sont résistantes, certains individus étant capables de s'échapper ou de survivre à l'enfouissement et à une forte turbidité temporaire. Cependant, ces espèces ne peuvent pas résister à des rechargements massifs, c'est-à-dire un dépôt d'une épaisseur importante de sédiment allochtone. Une analyse détaillée de cet aspect est réalisée dans le rapport. Par ailleurs, majoritairement inféodées à des fonds sableux fins à grossiers, elles sont également communes sur l'ensemble des littoraux de la région, ce qui favorise la recolonisation rapide des plages engraisées à partir des zones voisines non-impactées. La restauration du peuplement initial serait par ailleurs accélérée sur ces deux sites par l'hydrodynamisme important. **En conclusion, on peut considérer que l'impact immédiat des rechargements sur les peuplements benthiques des petits fonds sableux est important (mortalité forte), mais qu'au regard de la faible diversité naturelle des milieux et d'une recolonisation rapide des sites, l'impact à plus long terme est relativement réduit.** Le problème se pose davantage pour les donax (*Donax trunculus*) qui sont exploitées par les pêcheurs à pieds. Toutefois, il faut rappeler que les plages font l'objet de rechargement parce qu'elles sont en forte érosion et que les opérations d'engraissement contribuent à restaurer l'habitat de l'espèce. Ceci reste vrai dans la

mesure où les sables apportés sur les plages sont identiques aux sédiments présents avant les travaux.

A partir de l'expérience menée dans ce travail une proposition d'une **méthodologie adaptée d'évaluation des impacts des rechargements sous-marins sur les populations benthiques** est réalisée dans le document complet en annexe. Il faut s'y reporter pour en prendre connaissance dans le détail, la proposition de la méthodologie globale étant axée sur la description des travaux de dragage et de rechargement et celle des milieux, notamment l'établissement du profil biologique.

Tâche B : Modélisation numérique des sites naturels pilotes (LEGI/IMFT/IMAGES)

B.1. Introduction

Pour prévoir la dynamique de rechargements d'avant-côte on peut s'appuyer sur des modèles numériques. Le rechargement en sable de la partie immergée de la plage est de plus en plus reconnu comme étant une solution appropriée pour la protection du littoral. Les méthodologies de rechargement doivent être néanmoins adaptées aux conditions hydrodynamiques et sédimentaires que peuvent présenter les littoraux sableux. Les modèles numériques sont des outils de modélisation, ils peuvent être utilisés afin d'évaluer les diverses solutions de rechargements possibles (Hamm *et al.*, 2002 et Capobianco *et al.*, 2002).

A notre connaissance, quelques modèles numériques ont déjà été mis en oeuvre en vue de leur validation dans différentes situations de rechargement des barres et/ou fosses d'avant-côte. Par exemple, trois rechargements successifs ont été réalisés sur le site de Egmond (Mer du Nord – Hollande) entre 1999 et 2000 avec un suivi continu du site (van Duin *et al.*, 2004). Plusieurs modèles numériques, 2DV, 2DH et 3D (Van Rijn *et al.*, 2003 ; van Duin *et al.*, 2004 ; Grunnet *et al.*, 2004 ; Grunnet et Ruessink, 2005 ; Grunnet *et al.*, 2005) ont été utilisés pour modéliser le comportement des rechargements pendant cette période. Les résultats ont montré l'utilité de ces modèles, bien qu'ils ne soient pas suffisamment précis pour décrire de façon fine l'évolution des profils de plage après un rechargement, en particulier près de la ligne de côte. Van Rijn *et al.*, (2003) ont montré par exemple que ces modèles numériques permettent d'obtenir de bons résultats pour l'estimation de l'hydrodynamique alors qu'ils restent moins précis pour décrire l'évolution morphodynamique à court (à l'échelle d'une tempête) comme à long terme (à l'échelle d'une saison).

B.2. Les stratégies de recherche

L'objectif de cette étude est d'utiliser des modèles morphodynamiques numériques développés par des équipes françaises pour estimer l'efficacité et la durabilité d'un rechargement effectué sur une avant-côte sableuse. Des critères d'évaluation propres au rechargement doivent être définis afin de pouvoir répondre à ces questions. La définition des critères pour une application de type ingénierie fait partie intégrante de l'objectif de ce travail (cf. partie détaillée dans la partie résultat du modèle MODHYS).

Les modèles numériques de type profil de plage transversaux 2DV principalement utilisés dans cette étude, basé sur la description des processus hydro-sédimentaires (Spielmann *et al.*, 2004), nécessitent des données comme le profil de plage et les caractéristiques de la houle au large, généralement obtenues par des mesures *in-situ* ou au large. A partir d'un profil de plage caractéristique, plusieurs types de rechargement sont envisagés comme par exemple, le rechargement des barres sédimentaires et/ou la création d'une barre littorale supplémentaire au large des barres existantes (Fig. B.1). Comme la majorité de l'érosion de la côte survient lors des tempêtes, l'étude numérique se fait à l'échelle typique d'une tempête qui est de l'ordre d'une journée.

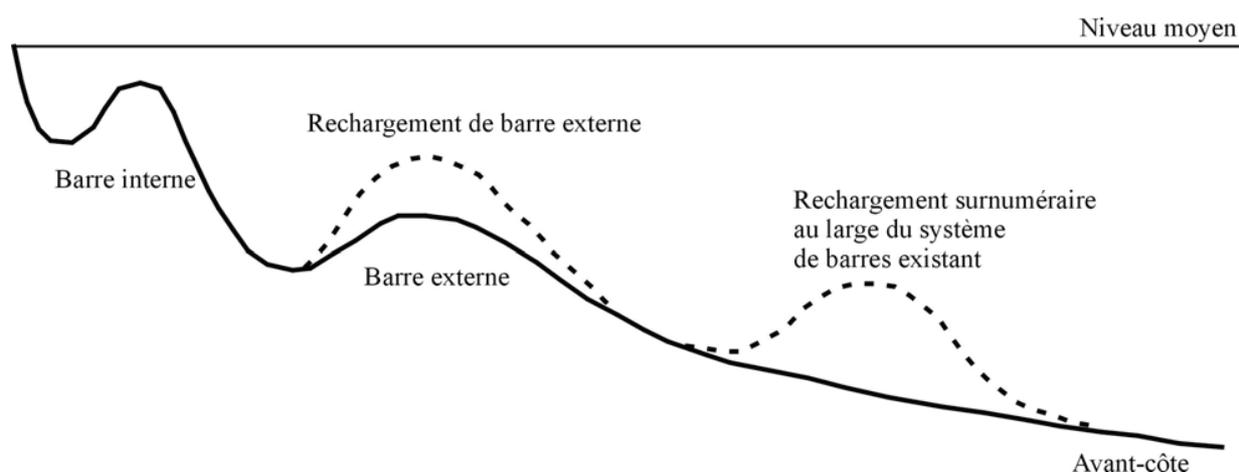


Fig. B.1 : Modalités de rechargements d'avant-côte envisagées, représentées en pointillés sur le profil d'origine naturel représenté en trait plein.

B.3. Les sites étudiés

Deux sites aux avant-côtes à barres sédimentaires représentatives du Languedoc-Roussillon ont été choisis : Sète et Leucate (Fig. B.2). L'une présente des barres rectilignes et l'autre des barres festonnées.

Caractéristiques générales

La plage de Sète est étroite (20 à 50 mètres de largeur), fortement affectée par les coups de mer. Le sédiment est entièrement sableux ; les tailles de grains s'échelonnent de 0,13 à 0,32 mm. Au large de la ligne de rivage, l'avant-côte dessine un système de barres et fosses de lévigation comprenant :

- une fosse interne entre le rivage et la première barre (dite interne) d'une largeur assez faible environ 50 à 100 mètres .
- une fosse externe (entre les barres externe et interne) d'une largeur de 250 à 300 mètres et un creux inter-barres d'une profondeur de 3 à 4 mètres ;
- un glacis d'avant-côte (au-delà de la barre externe) débute à partir de 5 mètres de profondeur avec un pente régulière de 0,85% ;

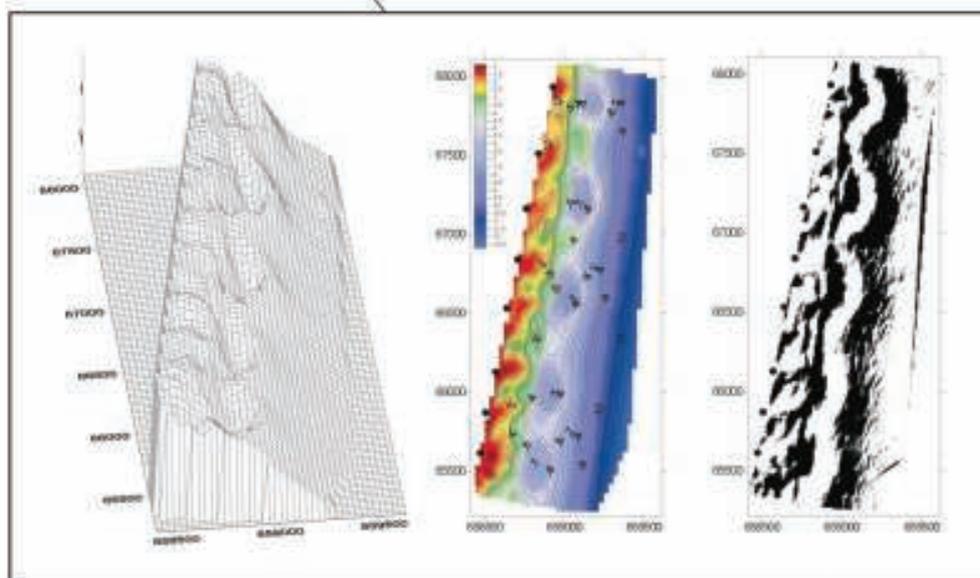
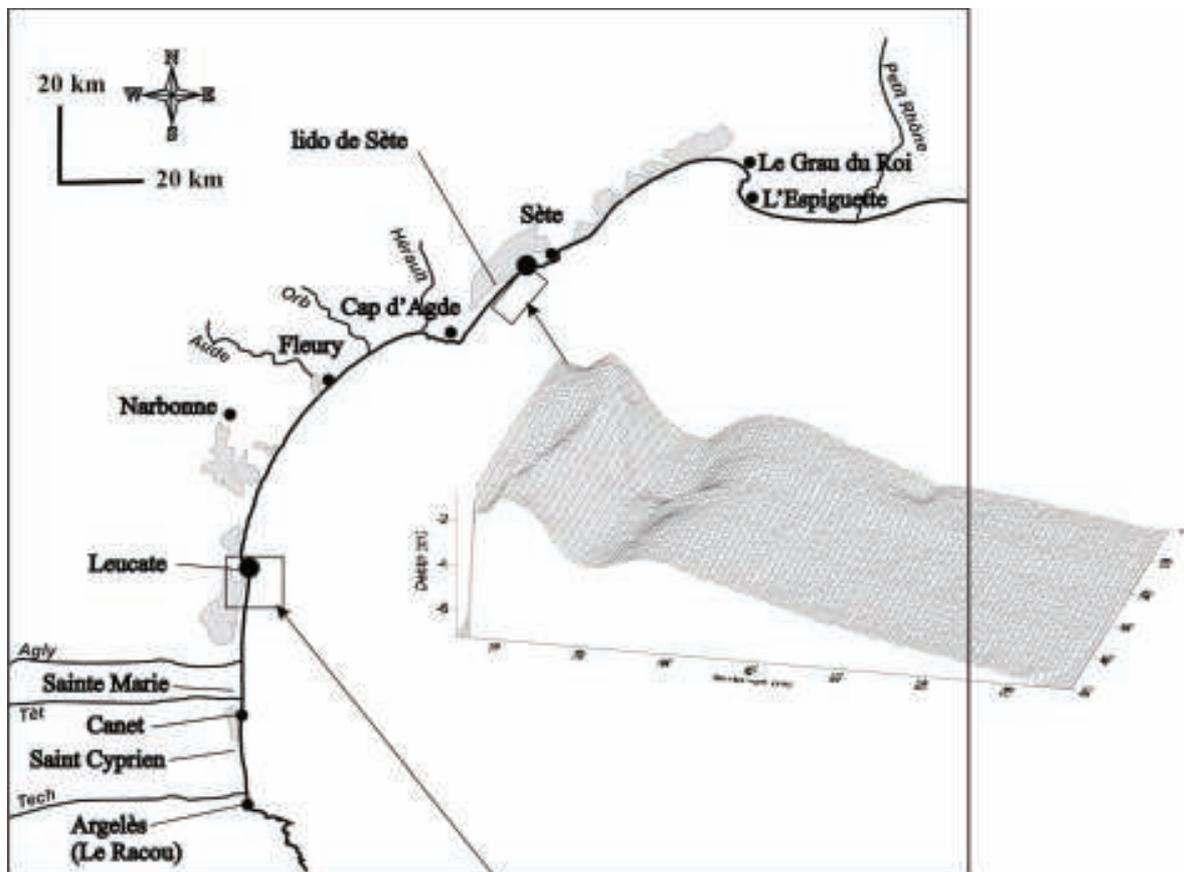


Fig. B.2 : localisation des sites d'étude et représentation en trois dimensions de leurs avant-côte à barres sédimentaires.

Le site de Leucate présente une granulométrie légèrement plus grossière et une plage plus large. La morphologie suit globalement le schéma décrit ci-dessus pour Sète mais il a la particularité de présenter des barres festonnées. Ces barres sont positionnées plus au large que les barres rectilignes de Sète. La barre externe se localise sur une profondeur comprise entre 5 et 7 m, elle présente une longueur d'onde de 500 m. Alors que la barre interne se situe sur une profondeur comprise entre 2 et 4 m, elle a une longueur d'onde plus réduite de l'ordre de 250 m.

Connaissances sur le comportement des barres

Les principaux résultats obtenus pour **le site de Sète** montrent que l'évolution morphologique des barres sédimentaires peut être exprimée par 2 modèles conceptuels, en réaction à la variabilité météo-marine. (1) Le modèle d'« oscillation autour d'une position d'équilibre » (O.P.E) traduit le régime ordinaire du comportement des barres, avec des reculs et des avancées successifs. Les barres migrent vers le large lors des tempêtes et vers la côte lorsque les conditions énergétiques deviennent plus calmes. Cette oscillation s'exprime à plusieurs rythmes. (i) A l'échelle des grandes phases évolutives des barres, longues périodes pouvant excéder plusieurs années durant lesquelles les barres présentent les mêmes caractères géométriques (position rectiligne, oblique ou plus sinueuse). Le passage de l'une à l'autre de ces phases se produit lorsque survient une tempête dont la hauteur significative excède 4 m. (ii) A l'échelle saisonnière, comme le souligne le comportement de la barre interne : durant l'été, lorsque les conditions d'agitation sont faibles, la barre vient s'accoler ponctuellement au rivage ; quand les conditions d'agitation deviennent plus énergiques en automne, la barre interne se reforme et recule vers le large. (2) Le modèle de "*net offshore migration*" (N.O.M) décrit la tendance à un recul des barres sous l'effet d'événements paroxystiques (tempêtes de probabilité vingtennale à cinquennale) préluant à leur dégénérescence. A partir de la position d'équilibre, la barre externe recule fortement à la suite d'un coup de mer particulièrement violent et s'abaisse. Au lieu de revenir à la côte, conformément au modèle O.P.E, elle perd du matériel au profit de la barre interne et dégénère. La barre interne, exposée à la houle, se met alors à reculer et remplace progressivement l'ancienne barre externe, tandis qu'une nouvelle barre interne est créée à la côte. Quelques années après l'événement déclencheur, la disposition standard est restaurée. Ces résultats et les modèles morphodynamiques qui ont pu être définis sont comparés à ceux décrits dans la littérature.

Les résultats obtenus pour **le site de Leucate** montrent que la barre interne est la structure la plus complexe et la moins stable, et semblerait fortement échanger avec la plage émergée. Elle conserve l'empreinte du dernier gros épisode de houle (tempête décennale) pour ce qui de la forme générale transverse des barres et des chenaux (TBR), son orientation peut être vers le N ou vers le sud en fonction du forçage. Elle est modelée ensuite superficiellement par plusieurs plus petits épisodes successifs. Ces derniers autorisent ou non la formation des festons reliant les barres (RBB), en fonction, il semblerait, de la période de la houle et de la durée du tombant propre à chaque épisode hydrodynamique forçant, mais aussi de l'espacement des événements dans le temps. Bien que dynamique, le motif interne ne semble pas se déplacer longitudinalement avec la dérive sédimentaire littorale, ou du moins revient rapidement en position d'équilibre. La barre externe est, elle, très stable, toujours festonnée (RBB) en liaison forte géométrique avec les sinuosités du trait de côte. Elle est séparée de la barre interne par une fosse qui semble limiter les échanges sédimentaires entre les deux structures. Elle se montre immuable dans sa forme et sa position. Seuls des événements supérieurs à 4 m remanient de manière visible le sable sur la barre

et font varier l'altitude des cornes. Cependant il est supposé que des tempête décennales ($H_s > 7\text{m}$), dont les impacts morphodynamiques sur l'avant-côte n'ont jamais été encore suivis, affecterait significativement la forme festonnée, au moins au cours du cycle de tempête. En fonction de la hauteur significative et de l'incidence de la houle deux séquences principales d'évolution ont pu être déterminées et aboutissent à la définition d'un modèle conceptuel (Ferrer et al. , 2009). Ces séquences décrivent les passages d'une morphologie en RBB vers une morphologie en RBB mieux formée et vers une morphologie en TBR.

B.4. Les outils utilisés

Le code numérique MODHYS (2DV) développé par l'IMFT, ainsi que le système hydro-informatique Télémac employé par le LEGI (Multi-1DH et 2DH), sont utilisés pour analyser les bénéfices que l'on pourrait retirer d'une modification des profils de plage par rechargement vis-à-vis de l'érosion littorale. Ces modèles permettent de prédire l'évolution à court terme d'un profil de plage, essentiellement dans des conditions hydrodynamiques de moyenne et de forte houle.

Une description technique complète de ces outils est donnée ci-dessous. On peut aussi se reporter au document de réponse à l'appel à projet pour plus de détail.

En utilisant le code de calcul 2DH Telemac (LNHE-Chatou, 2002), les modifications apportées par le LEGI ont consisté en la mise en place d'une procédure quasi-permanente liant les calculs de houle (la modélisation de la houle se fait par l'intermédiaire du code Artemis qui résout l'équation de Berkhoff avec intégration des processus de dissipation par déferlement et frottement sur le fond), d'hydrodynamique et de transport sédimentaire (Camenen et Larroudé, 2003, 2003b). Différentes formules de transport semi-empiriques pouvant être utilisées pour ce code ont été également testées. La chaîne de calcul Telemac constitue un modèle complet utilisant la méthode aux éléments finis et permettant la réalisation de différents calculs hydrodynamiques sédimentaires.

Un modèle morphodynamique Multi-1DH adapté au cas des plages sableuses peut également être utilisé. L'intérêt de ce modèle vient de l'intégration des effets du courant de retour, jouant un rôle primordial dans la construction de la barre de déferlement. L'évolution des fonds est ensuite calculée en imposant comme contraintes hydrodynamiques le courant de dérive littorale, selon la formule de Longuet-Higgins (1970) et le courant de retour (modèle basé sur l'approche de Svendsen, 1984). Le processus est répété à chaque fois que la variation des fonds est susceptible de modifier l'hydrodynamique. Ainsi, la construction de la barre pré-littorale, sa propagation du fait du courant "longshore" et les perturbations de la barre (chenaux des courants d'arrachement) sont calculées simultanément. Ce modèle permet ainsi de simuler la création de barres mais également leur migration et l'évolution des fonds à des échelles temporelles suffisamment longues ; ce qui a été fait sur le site de Sète à l'échelle du moyen terme.

Le code numérique MODHYS (Spielmann, 2002 ; Spielmann *et coll.*, 2004) permet de prévoir l'évolution du profil d'une plage sableuse soumise à l'action de la houle. Il décrit les processus hydrodynamiques et sédimentaires dans un plan vertical perpendiculaire à la ligne de côte. Le modèle est basé sur la description stationnaire de la propagation de la houle et du rouleau de déferlement ainsi que des courants induits qui en découlent. La réfraction et la

dissipation de la houle sont décrites par le modèle de Battjes et Janssen (1978) pour une houle aléatoire à partir des modèles de houle linéaire et cnoïdal au 1^{er} ordre. Le modèle de Nairn et coll. (1990) amélioré par l'approche de Stive et De Vriend (1994) est retenu pour modéliser le rouleau de déferlement. Dans le module de courant, la modélisation de la turbulence est effectuée à partir d'un modèle à 0-équation prenant en compte la génération de turbulence par le cisaillement sur le fond induit par le mouvement orbital de la houle et par le déferlement de la houle (Spielmann *et coll.*, 1999). Le niveau moyen de la surface libre est ensuite calculé à partir de l'équilibre entre le gradient de pression horizontal et celui des contraintes de radiation induites par la houle et le rouleau de déferlement. L'estimation de la structure verticale de la vitesse horizontale moyenne est basée sur l'équation de la quantité de mouvement stationnaire (moyennée sur une période de houle) où les termes d'advection et de diffusion horizontales sont négligés en raison du caractère dominant de l'injection de turbulence en surface par le déferlement de la houle. Dans le module sédimentaire, le flux de sédiments prend en compte le flux par charriage et le flux par suspension. Le charriage, induit par la non-linéarité de la vitesse orbitale de houle sur le fond, est estimé à l'aide de la formule de Bailard et Inman (1981) basée sur la houle cnoïdale au 1^{er} ordre. Le flux en suspension est calculé explicitement à partir des profils verticaux de la vitesse horizontale moyenne (module de courant) et de la concentration moyenne de sédiments en suspension, calculée à partir de l'équation de conservation de la masse des sédiments. Plusieurs paramétrisations classiques de la concentration de référence ont été testées ainsi qu'une nouvelle formulation basée sur le cisaillement en surface induit par le déferlement de la houle (Spielmann *et coll.*, 2001). Finalement, l'évolution de la bathymétrie est calculée à partir de l'équation de conservation des sédiments en supposant une porosité du fond nulle.

B.5. Les cas d'étude et la méthodologie suivie

Plusieurs scénarios de simulation numérique ont été envisagés afin de tester si la modification des profils de plage, et donc des barres littorales, permet de renforcer la protection du littoral sur les sites de Sète et de Leucate.

Pour la plage de Sète qui présente des barres rectilignes, nous avons étudié un profil type présentant une 3^{ème} barre au large, dite barre surnuméraire, ainsi que le rechargement de la barre externe (Fig. B.1). Pour la plage de Leucate qui présente des barres festonnées (Fig. B.2), trois profils ont été retenus afin de rendre compte des diverses configurations, les profils P3, P7 et P9. En effet, la principale difficulté pour ce site, pour les modèles transversaux 2DV, c'est que le caractère tridimensionnel des barres ne permet pas d'appréhender l'avant-côte avec un profil unique. Les trois profils retenus correspondent donc aux configurations majeures que l'on peut rencontrer : **un qui passe par la corne d'une barre externe (P3), un qui passe par un ventre (P9) et un intermédiaire (P7)** (Fig. B.3). Ils permettent de raisonner comme si l'on se plaçait sur des avant-côtes différentes pour chaque configuration. Cette méthode qui présente certaines limites est compensée par ailleurs par l'utilisation du modèle 2DH Télémac qui considère l'avant-côte dans son ensemble.

Sur ces trois profils naturels, différents rechargements sont envisagés **1) simulation 1= rectiligne au niveau des ventres des festons externes, 2) simulation 2= par tronçons au niveau des cornes de barres externes (sim. 2.1) ou des ventres (sim. 2.2), 3) simulation 3= en créant une barre surnuméraire rectiligne au large**. On a fait le choix volontairement de choisir de gros volumes de rechargement.

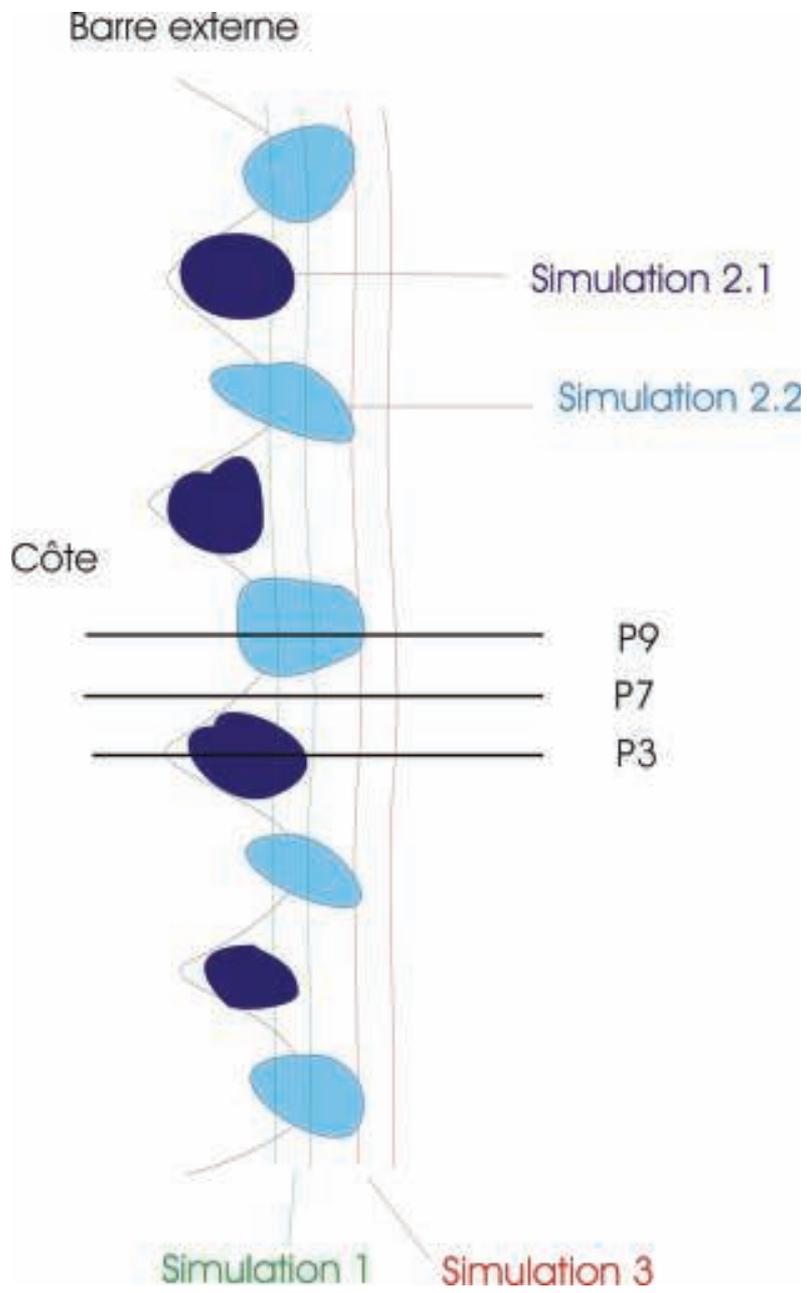


Fig. B.3 : Localisation des trois profils retenus

Trois scénarios de houle ont été simulés en relation avec les observations qui ont pu être réalisées sur le secteur (bouée DRE-LR) : un forçage permettant de simuler une tempête exceptionnelle, notée TE ($H_s=4$ m sur le glacis et $T=10$ s), un pour une tempête « classique », notée TC, qui a lieu une fois par an ($H_s=2,5$ m et $T=7$ s) et enfin un régime de « tombant de tempête », noté TT ($H_s=1$ m et $T=6,5$ s) (Tableau B.1). Pour chaque forçage, seule l'incidence normale à la plage ($\theta=0^\circ$) est considérée pour les modèles 2DV. Il faut noter que les données de houle considérées dans cette étude et qui sont données dans le tableau suivant correspondent aux hauteurs significatives à l'entrée du système de barres, de façon à donner aux différents modèles (numériques et physique) directement les valeurs nécessaires à l'entrée de leurs conditions limites au large. Les données correspondantes sur l'enregistrement temporel au large (-30m) sur lequel est faite cette estimation sont donc plus importantes car la houle n'a pas encore subi de transformations liées au fond.

	Hs (m) (sur les fonds de -6m)	Ts (s)
Tempête exceptionnelle TE	4	10 s
Tempête classique TC	2,5	7 s
Tombant de tempête TT	1	6,5

Tabl. B.1 : les scénarios de houle utilisés pour les modélisations

En résumé, dans le cadre de ce projet, le but est d'utiliser les modèles numériques dans les configurations de bathymétries proposées. Pour la plage de Sète, à partir du profil initial, deux profils bathymétriques ont été définis correspondant à un rechargement de la barre externe et à la création d'une 3ème barre au large. Pour la plage de Leucate qui possèdent une bathymétrie plus complexe, trois profils initiaux différents ont été définis, qui font chacun l'objet d'un rechargement de barre externe et de création d'une barre surnuméraire.

Pour les deux sites d'étude, trois scénarios de forçages de houle sont pris en compte permettant de simuler une tempête classique (TC), une tempête exceptionnelle (TE) et un tombant de tempête (TT). Les résultats obtenus nous permettront d'analyser le rôle des rechargements sur l'érosion de la plage et de prédire le scénario de bathymétrie le plus approprié.

B.6. Résultats

B.6.1 RESULTATS OBTENUS POUR MODHYS

Nous avons souhaité, en plus de la simple analyse de l'évolution morphologique comme diagnostic, établir un certain nombre de paramètres ou critères permettant de quantifier précisément l'efficacité des rechargements d'avant-côte. On présentera les critères retenus et leur caractérisation avant de présenter les observations réalisées.

- Critères d'analyse.

Le modèle numérique MODHYS utilisé pour cette étude ne prend pas en compte l'évolution de la plage émergée, puisque les processus spécifiques à la zone de jet de rive ne sont pas modélisés. Des critères d'évaluation des stratégies de rechargement autre que la simple

évolution de la largeur de plage ont donc été définis à partir des résultats du modèle. Ces critères peuvent être classés en deux classes : (1) les critères de “design” utilisés pour estimer la pertinence des rechargements et (2) les critères de “diagnostic” permettant d'effectuer une analyse détaillée du comportement du système. Ces critères permettent par la suite d'établir un meilleur diagnostic sur l'efficacité des rechargements dans la partie résultats. Le profil de plage étudié doit tout d'abord être découpé en plusieurs zones Z_i comme la zone du large, la zone des barres, la zone des creux et la zone proche de la ligne de côte. Avant d'introduire les critères, des variables intégrées sur chaque zone doivent être définies :

- le volume de sédiment déposé dans la zone concernée pendant la phase de rechargement :

$$V_{Z_i} = \frac{1}{L_{Z_i}} \int_{Z_i} (z_b^{P_x}(x, t=0) - z_b^{P_n}(x, t=0)) dx$$

où L_{Z_i} est la longueur de la zone Z_i , $z_b^{P_x}(x, t=0)$ la position initiale du fond pour le profil P_x et $z_b^{P_n}(x, t=0)$ la position initiale du fond pour le profil naturel P_n .

- le volume de sédiment déplacé par l'écoulement dans la zone Z_i entre $t=0$ et t :

$$V_{Z_i}^P(t) = \frac{1}{L_{Z_i}} \int_{Z_i} (z_b^P(x, t) - z_b^P(x, t=0)) dx$$

avec $z_b^P(x, t)$ la position du fond pour le profil P .

Les critères de « design » sont définis selon les trois objectifs suivants :

- 1) Le coût du rechargement qui est estimé à partir du volume total de sédiment déplacé pendant la phase de rechargement : $V_p = \int_P (z_b^{P_x}(x, t=0) - z_b^{P_n}(x, t=0)) dx$.
- 2) L'efficacité de la protection du littoral. Plusieurs critères sont définis pour cet objectif :
 - a) Le critère de la dissipation de l'énergie de la houle, $|E_{it} - E_0|/E_0$, où E_{it} est l'énergie de houle dans le creux interne et E_0 l'énergie de houle au large. Ce critère estime donc le pourcentage de l'énergie de la houle qui a été dissipé le long du profil et donc celui qui reste disponible pour le déplacement du sable et donc pour l'érosion.
 - b) Le critère de l'augmentation du niveau moyen de la surface libre, $\bar{\eta}(x_b) - \bar{\eta}_0$, où $\bar{\eta}(x_b)$ est le niveau moyen de la surface libre proche de la côte et $\bar{\eta}_0$ le niveau moyen de la surface libre au large (Longuet-Higgins, 1953). En effet, ce critère indique à quel niveau de la plage émergée l'érosion est susceptible de survenir.
 - c) Le rapport des volumes de sédiment déplacé par l'écoulement entre le profil rechargé P_x et le profil naturel P_n , $V_{Z_i}^{P_x}(t)/V_{Z_i}^{P_n}(t)$. Ce critère permet de comparer le volume de sable

érodé dans la zone Z_i avant et après le rechargement. L'impact du rechargement sur une zone donnée peut ainsi être estimé.

- 3) La durabilité du rechargement. Elle est reliée au taux d'érosion des zones rechargées qui doit être le plus faible possible :
 - a) Le rapport entre le volume de sédiment érodé par l'écoulement pendant un temps donné et le volume de sable rechargé dans la zone Z_i , $V_{Z_i}^{P_x}(t)/V_{Z_i}$. Ce critère permet de déterminer à quelle vitesse le sable ajouté pour le rechargement est déplacé par l'écoulement et donc si la stratégie de rechargement est pertinente dans le temps.
 - b) $V_{Z_i}^{P_x}(t)/V_{Z_i}^{P_n}(t)$ (voir précédemment) estimé dans la zone rechargée.

Les critères de “diagnostic” sont définis afin d'analyser le comportement du système. Le taux de dissipation de la houle et du rouleau de déferlement sont des critères importants puisqu'ils permettent de déterminer comment l'énergie de la houle est dissipée le long du profil et donc d'estimer la quantité d'énergie qui arrive sur le littoral. La paramétrisation de la concentration de référence utilisée ici est fonction du taux de dissipation de l'énergie du rouleau $D_r(x)$ ce qui implique que $D_r(x)$ joue un rôle clé dans la distribution le long du profil du flux de sédiment en suspension (Spielmann *et coll.*, 2004).

Les critères de diagnostic utilisés ici sont :

2. Le maximum du taux de dissipation de l'énergie du rouleau sur la 3^{ème} barre D_r^{3b} . Ce critère estime l'intensité de l'atténuation de la houle induite par la présence de la 3^{ème} barre au large.
3. Le maximum du taux de dissipation de l'énergie du rouleau sur la barre externe D_r^{ob} . Ce critère estime l'intensité de l'atténuation de la houle induite par la présence de la barre externe.
4. Le maximum du taux de dissipation de l'énergie du rouleau sur la barre interne D_r^{ib} . Ce critère estime l'intensité de l'atténuation de la houle induite par la présence de la barre interne.
5. Le maximum du taux de dissipation de l'énergie du rouleau proche de la plage, D_r^b . Ce critère estime l'intensité de l'atténuation de la houle induite par la pente de fin de plage quand l'énergie de la houle reste importante à ce niveau.

Quand il n'y a pas de maximum, nous avons juste relevé les valeurs de D_r à la localisation des maxima présents pour les autres cas.

- Résultats.

Les résultats obtenus avec le modèle sont analysés en terme d'hydrodynamique et de transport sédimentaire à un instant donné d'une part et en terme d'évolution de la bathymétrie sur 24h d'autre part (pas de temps de 2 min), pour tous les cas d'étude envisagés.

Comme le modèle de houle retenu est celui d'une houle aléatoire en hauteur (Battjes et Janssen, 1978), tous les calculs liés à la houle sont basés sur H_{rms} (hauteur quadratique moyenne de houle) sachant que : $H_{rms} = H_s / \sqrt{2}$.

Le tableau B.2 résume les paramètres et les données (entrées du modèle) utilisés pour les différentes simulations.

Entrées		Paramètres du modèle	(voir Spielmann, 2002)
$H_{rms,0}, T, \theta_0=0^\circ$	valeurs fixées (3 cas)	ε_b	0,21
$d(x, t_0)$	profil initial + profils rechargés	α_c	$10^{-5}, 10^{-6}$
ρ	1035 kg/m ³	α_d	0,1
ρ_s	2650 kg/m ³	n_x, n_z	200, 200 ou 400
D_{50}	$2 \cdot 10^{-4}$ m	Δt	2 min

Tableau B.2 : paramètres et données d'entrée du modèle Modhys

Pour chaque plage étudiée, nous avons donc effectué les différentes simulations pour d'évaluer la pertinence des différents rechargements en fonction des conditions de houle. Les variables que sont la hauteur quadratique de houle H_{rms} la dissipation du rouleau de déferlement D_r , le transport total de sédiment q_t et son gradient horizontal sont analysées. Ensuite, nous nous intéressons à l'évolution de la bathymétrie sur 24h selon les 3 conditions de houle sachant que pour la tempête exceptionnelle, nous avons augmenté la profondeur de 1m de façon uniforme le long du profil de manière à simuler la surcôte.

- Analyse des résultats.

A. Plage de Sète.

Les figures de B.4 à B.15 illustrent les résultats obtenus. Les figures B.4 à B.6 illustrent l'ensemble des paramètres calculés (hydrodynamique et transport sédimentaire) sur les profils naturels et rechargés pour les trois scénarios d'agitation (TC, TE et TT). Les figures suivantes détaillent les évolutions morphologiques observées. Les figures B.7 à B.9 montrent l'évolution du profil naturel sous l'influence des trois scénarios hydrodynamiques retenus. Les figures B.10 à B.12 illustrent les évolutions morphologiques constatées pour un rechargement sur la barre externe sous les trois conditions de forçage ; les figures B.13 à B.15 pour un rechargement surnuméraire avec création d'une troisième barre au large.

Evolution des paramètres hydro-sédimentaires et morphologiques

Profil naturel

On remarque que les différentes conditions de forçage influencent fortement la partie interne du profil naturel pour les temps de simulations les plus longs, avec un fort recul de la barre interne puis un lissage qui se traduit simultanément par un engraissement du revers de la barre et un comblement de la fosse externe (TC et TE, fig. B.7 et B.8). Pour la situation de tombant de tempête (Fig. B.9), le recul de la barre interne n'est pas observé, par contre son lissage sur des temps de simulation longs est avéré. Dans le détail on note que pour TC (Fig. B.4) la dissipation d'énergie est modérée sur la barre externe et forte sur la barre interne. Pour TE (Fig. B.5), la dissipation est forte dès l'entrée du domaine et la hauteur de houle à la plage reste élevée (1m). Pour TT (Fig. B.6), les conditions sont moins énergétiques mais la hauteur de la houle à la côte peut être équivalente avec celle en TC après déferlement (0,4 m). Dans certains cas, comme pour TT ou TC, le flux de sédiment peut être dirigé vers la côte au large de la zone des brisants.

Rechargement de barre externe

Pour les rechargements de barre externe, on note que le comportement des profils est globalement identique pour les trois conditions d'agitation et proche des situations observés pour le profil naturel, à savoir que le système interne réagit fortement pour des temps de simulations longs, sans toutefois que le recul important de la barre interne dans les premiers temps de simulations soit observé (Fig. B.10 à B.12). On remarque aussi peu d'évolution lors des premières heures de la tempête, puis une tendance au lissage du profil (érosion des crêtes et comblement des fosses (Fig. B.10). Le rechargement lui-même est par ailleurs attaqué et diminue en hauteur. Concernant le déferlement (Fig. B.4 à B.5), il est marqué et permet d'induire une hauteur de houle moins importante et une dissipation du déferlement plus importante que dans le cas sans rechargement pour TC et TE. Par ailleurs le transport peut être dirigé vers la côte par TC lors de ces rechargements de barre externe. Ce transport positif n'induit cependant pas de conséquence importante pour l'évolution du fond.

Il faut noter que la tendance observée au lissage du profil bathymétrique (érosion des crêtes et comblement des creux) est assez forte en raison du choix qui a été fait dans le schéma numérique de résolution de l'évolution du fond. La diffusion excessive permet d'expliquer ce phénomène, tout comme elle permet d'expliquer le comportement anormal de l'exportation de matériel vers le large en bordure externe du domaine pour TE et TT (Fig. B.11 et B.12), qui est en réalité un artéfact.

Rechargements surnuméraires

Pour les rechargements surnuméraires, on assiste à un recul de la barre interne sous le forçage TC (Fig. B.13), avec un lissage du profil dans sa partie interne et un comblement de la fosse externe pour les temps de simulation les plus longs, mais aucune érosion de la barre externe. Le rechargement au large subit un début d'érosion. La brisance est forte au niveau du rechargement surnuméraire (Fig. B.4), mais ensuite l'énergie dans la zone interne est aussi importante que pour le cas naturel. Pour le tombant de tempête (Fig. B.15), la situation finale au bout de 24 h est identique mais la réaction du système interne et l'érosion du rechargement surnuméraire est beaucoup plus faible lors des premiers pas de temps de la modélisation, avec la barre interne en particulier qui ne subit pas de recul (Fig. B.15). Pour TE (Fig. B.14) lors des premiers temps de

la modélisation, c'est la morphologie créée par le rechargement qui évolue fortement en migrant vers le large, **le système interne étant peu soumis à des modifications et la barre externe ne subissant pas d'érosion**. La brisance est très forte au niveau du rechargement surnuméraire, ainsi que le transport, induit vers le large (Fig. B.5). Ensuite lorsque les durées de simulations augmentent et que le rechargement migre vers des étages bathymétriques inférieurs, le système interne se comporte comme pour les deux autres conditions de forçage. L'énergie dans la zone interne est alors aussi importante que pour le cas naturel et la hauteur de houle à la côte reste élevée (1m comme dans le cas naturel). Le rechargement de barre surnuméraire permet donc d'encaisser les conditions les plus dynamiques lors des premiers temps de la tempête. Si on augmente la durée de calcul, le modèle cesse ensuite de fonctionner correctement.

Synthèse

Les figures semblent montrer qu'on n'observe pas de grandes différences entre le cas naturel (érosion et recul du système interne lors des temps les plus longs de simulation) et les cas de rechargement sauf lors de situations particulières.

1) On n'observe pas le recul de la barre interne mais uniquement son lissage pour le rechargement de BE. De plus, on remarque moins d'érosion lors des premiers temps de la modélisation, et l'étude des paramètres hydro-sédimentaires montrent **le rôle important du rechargement de la barre externe dans la brisance et la diminution de l'énergie qui arrive à la côte**.

2) **Pour le rechargement surnuméraire en TE, le système interne et externe résiste bien à l'érosion dans les premiers temps de simulation**. La barre externe ne subit pas alors d'érosion et la brisance au niveau du rechargement surnuméraire est importante même si l'énergie qui arrive ensuite à la côte reste élevée. Concernant l'hydrodynamique, ce sont les rechargements de la barre externe qui diminuent le plus le déferlement sur le système interne pour TC et TE, ainsi que le transport.

En conclusion :

Le fait de mettre une 3^{ème} barre au large ne semble pas améliorer la protection du profil près de la plage pendant les régimes de tempête classique et de tombant de tempête. Seule l'augmentation de la hauteur de la barre externe de 1m permet d'obtenir de bons résultats pour ces 2 régimes comme nous l'avons montré dans le cadre de Liteau 1 et Beachmed-e GESA sur d'autres avant-côtes. Par contre, pour la tempête exceptionnelle, le fait de créer une 3^{ème} barre au large semble être une solution adéquate lors des premières phases de déroulement de la tempête en terme de protection du littoral puisque la houle perd une grande partie de son énergie au niveau de cette barre et que le système interne réagit peu.

Sète : tempête classique.

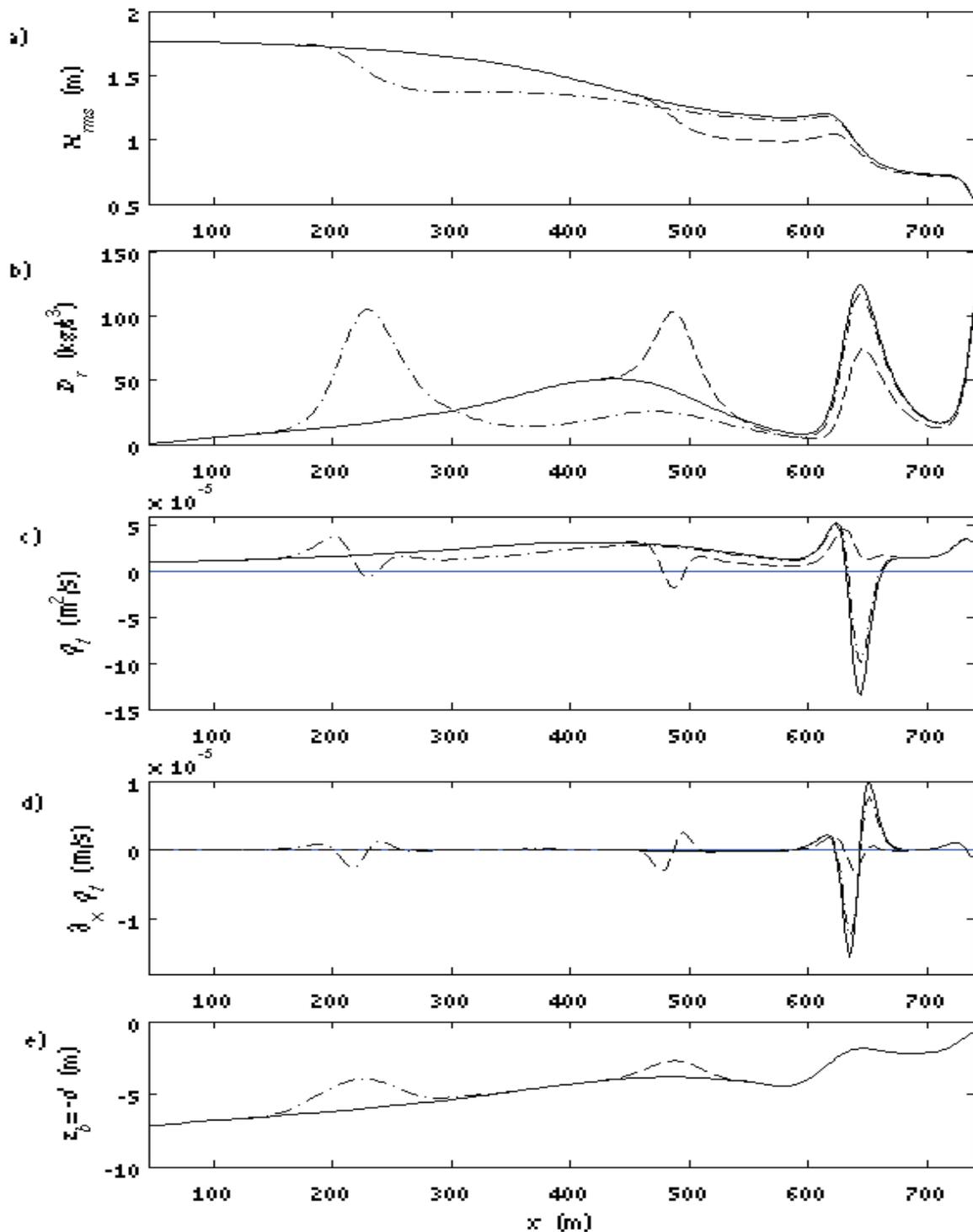


Figure B.4 : Profils de (a) hauteur de houle $H_{rms}(x)$, (b) taux de dissipation du rouleau de déferlement $D_r(x)$, (c) flux total de sédiment q_t , (d) gradient horizontal du flux total de sédiment $\partial_x q_t$, (e) (---) fond initial, (- -) fond rechargé, (-.-) fond avec une 3^{ème} barre.

Sète : tempête exceptionnelle.

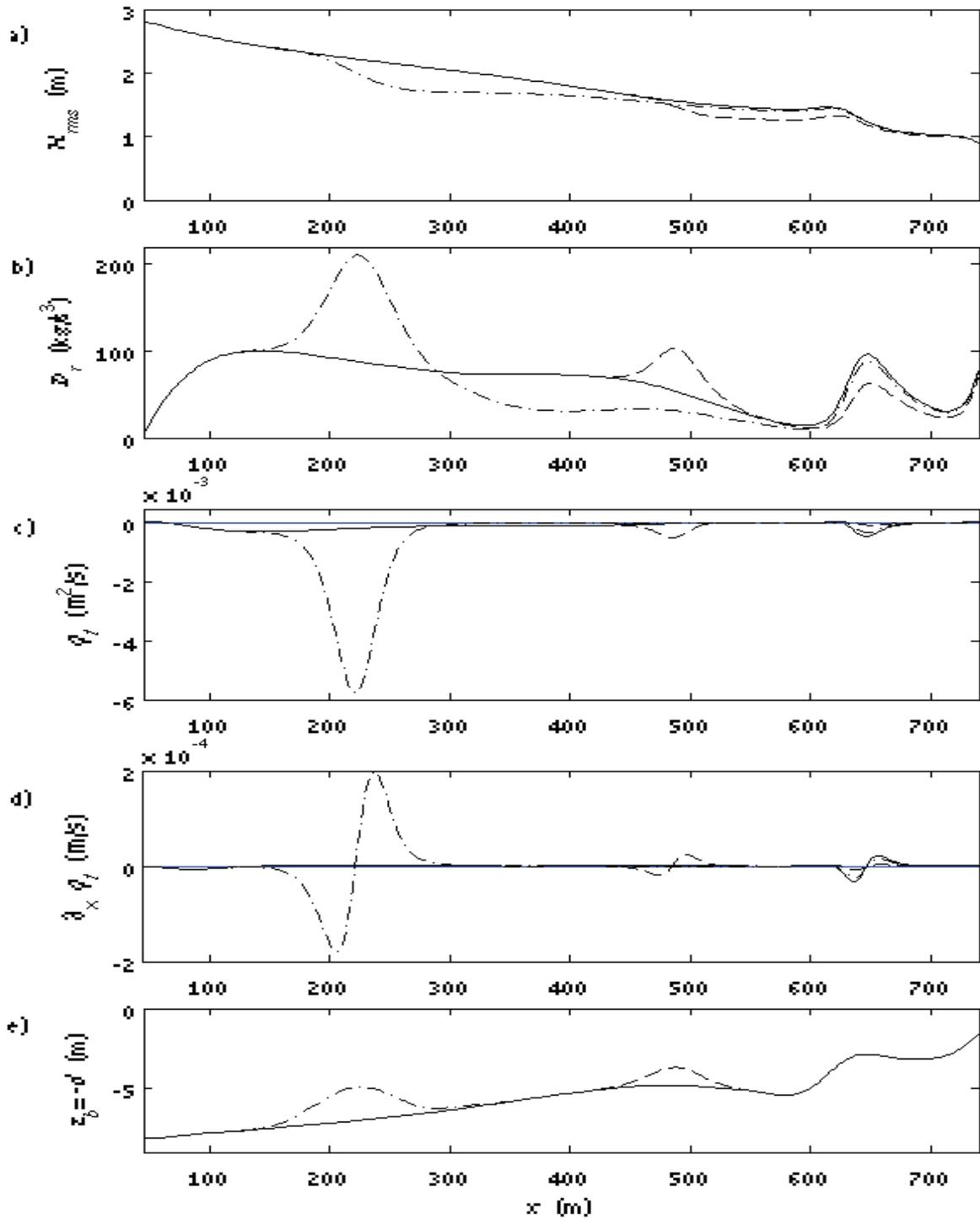


Figure B.5 : Profils de (a) hauteur de houle $H_{rms}(x)$, (b) taux de dissipation du rouleau de déferlement $D_r(x)$, (c) flux total de sédiment q_t , (d) gradient horizontal du flux total de sédiment $\partial_x q_t$, (e) (---) fond initial, (- -) fond rechargé, (-.-) fond avec une 3^{ème} barre.

Sète : tombant de tempête.

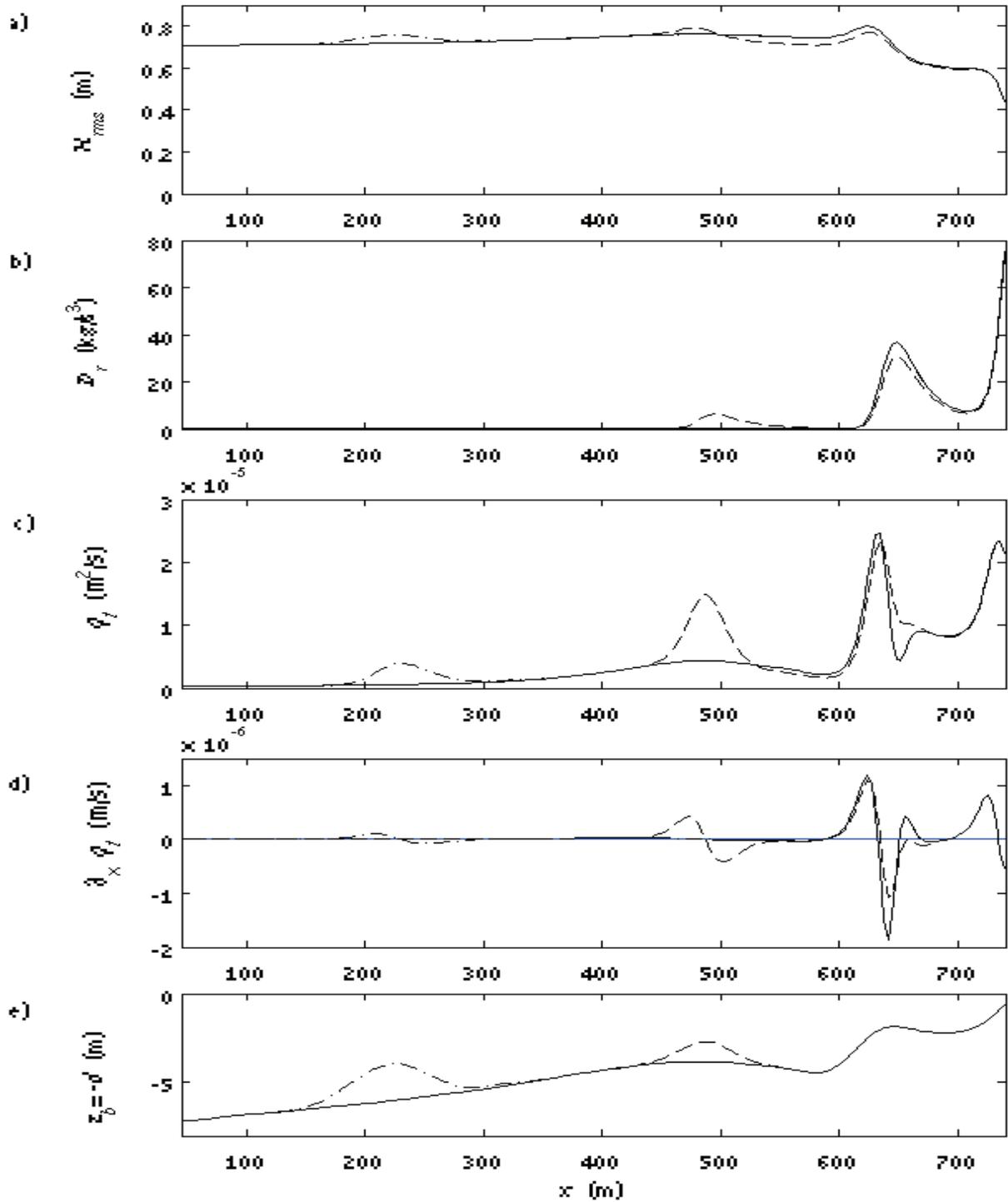


Figure B.6 : Profils de (a) hauteur de houle $H_{rms}(x)$, (b) taux de dissipation du rouleau de déferlement $D_r(x)$, (c) flux total de sédiment q_t , (d) gradient horizontal du flux total de sédiment $\partial_x q_t$, (e) (---) fond initial, (- -) fond rechargé, (-.-) fond avec une 3^{ème} barre.

Sète : évolution du fond initial – tempête classique.

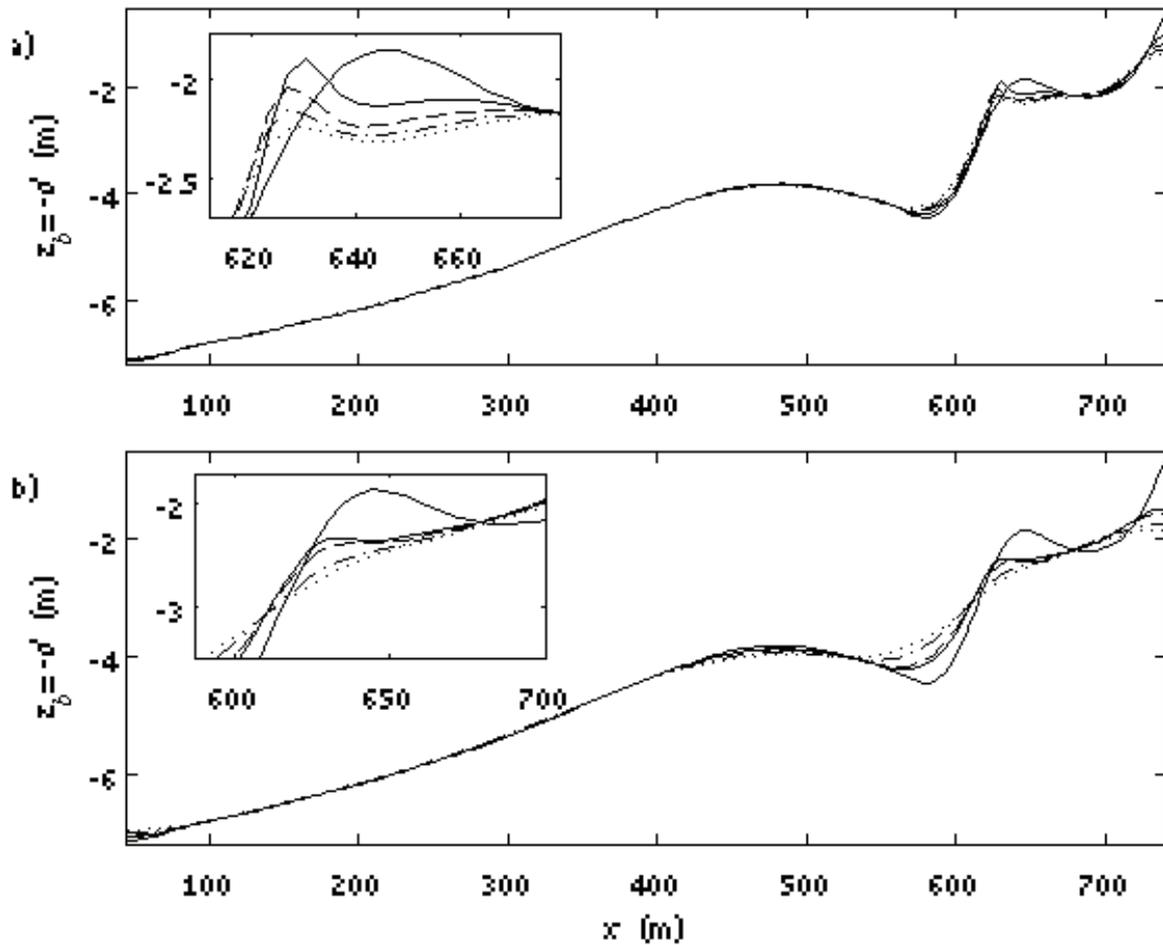


Figure B.7 : Evolution du profil de bathymétrie initial (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1$ h, (- -) $t=2$ h, (-·-) $t=3$ h, (···) $t=4$ h, (b) (—) $t=6$ h, (- -) $t=8$ h, (-·-) $t=16$ h, (···) $t=24$ h.

Sète : évolution du fond initial – tempête exceptionnelle.

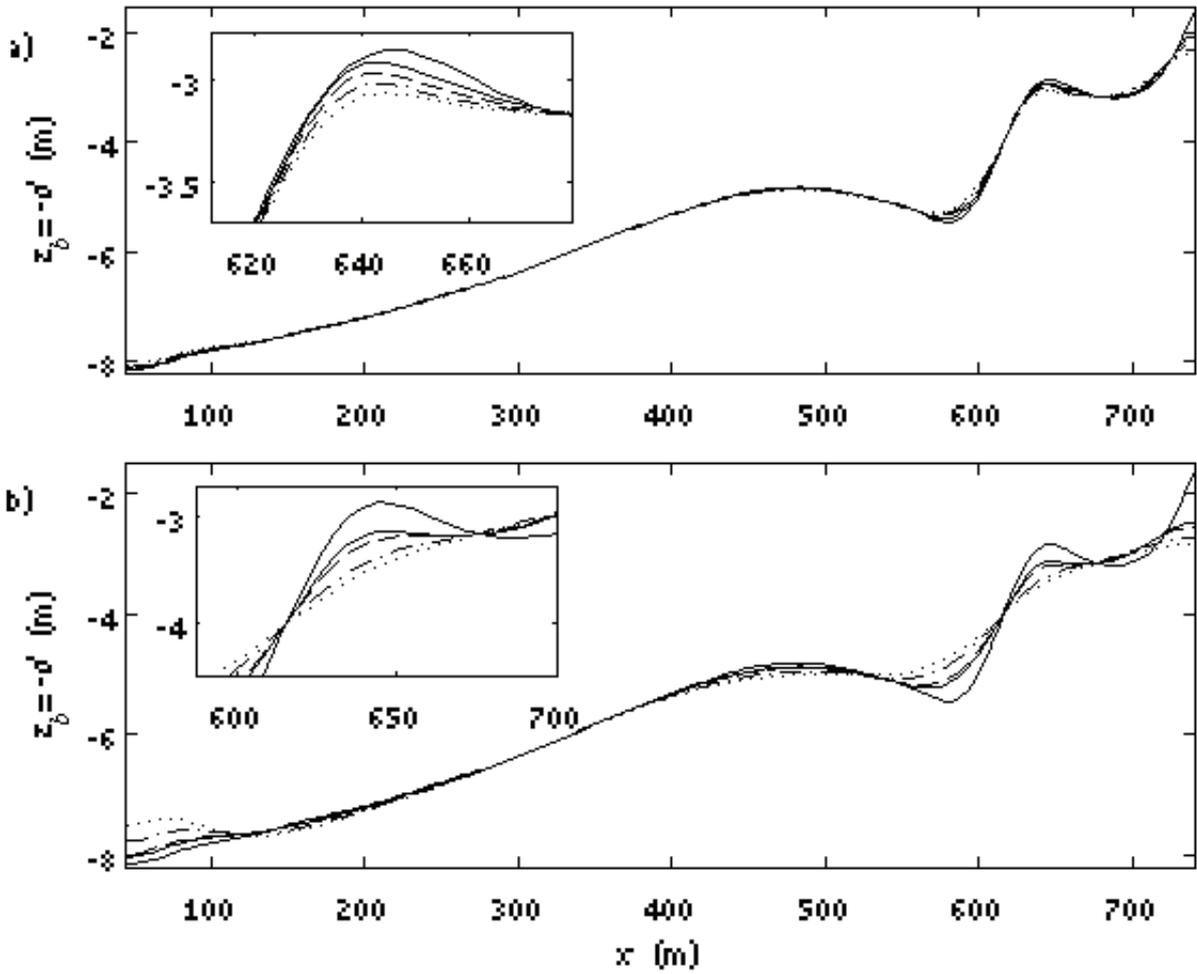


Figure B.8 : Evolution du profil de bathymétrie initial (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-·-) $t=3h$, (··) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-·-) $t=16h$, (··) $t=24h$.

Sète : évolution du fond initial – tombant de tempête.

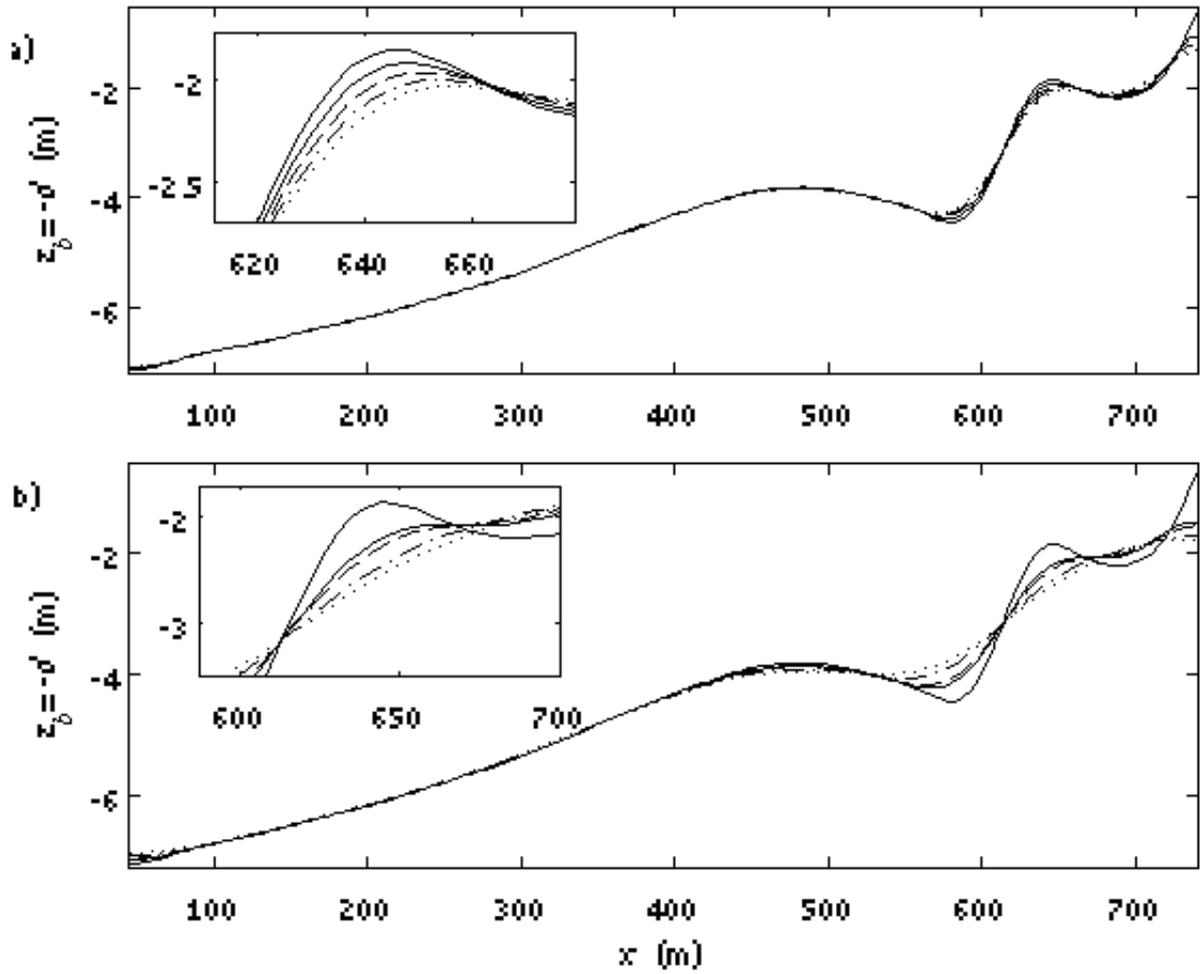


Figure B.9 : Evolution du profil de bathymétrie initiale (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1$ h, (- -) $t=2$ h, (-·-) $t=3$ h, (···) $t=4$ h, (b) (—) $t=6$ h, (- -) $t=8$ h, (-·-) $t=16$ h, (···) $t=24$ h.

Sète : évolution du fond rechargé – tempête classique.

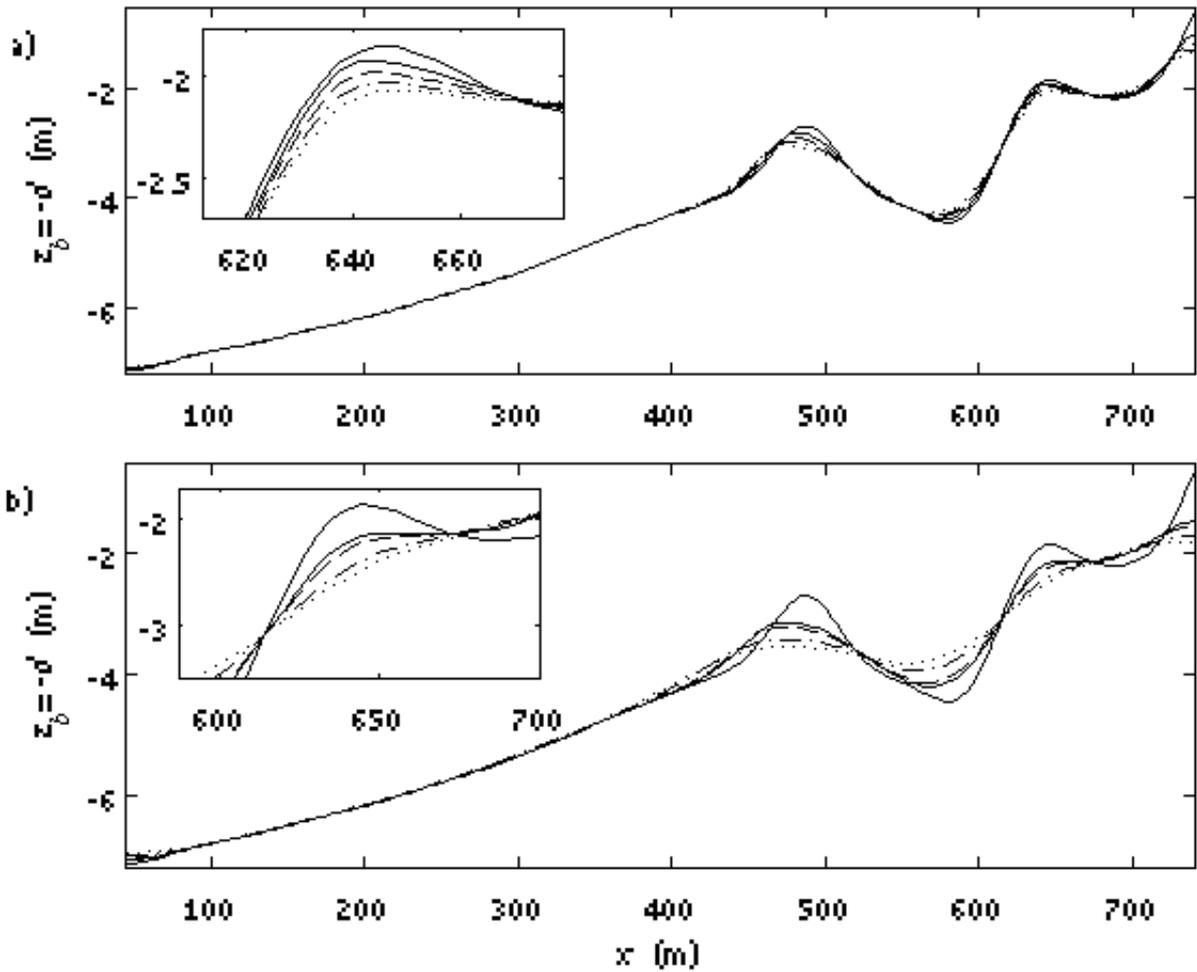


Figure B.10 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-·-) $t=3h$, (···) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-·-) $t=16h$, (···) $t=24h$.

Sète : évolution du fond rechargé – tempête exceptionnelle.

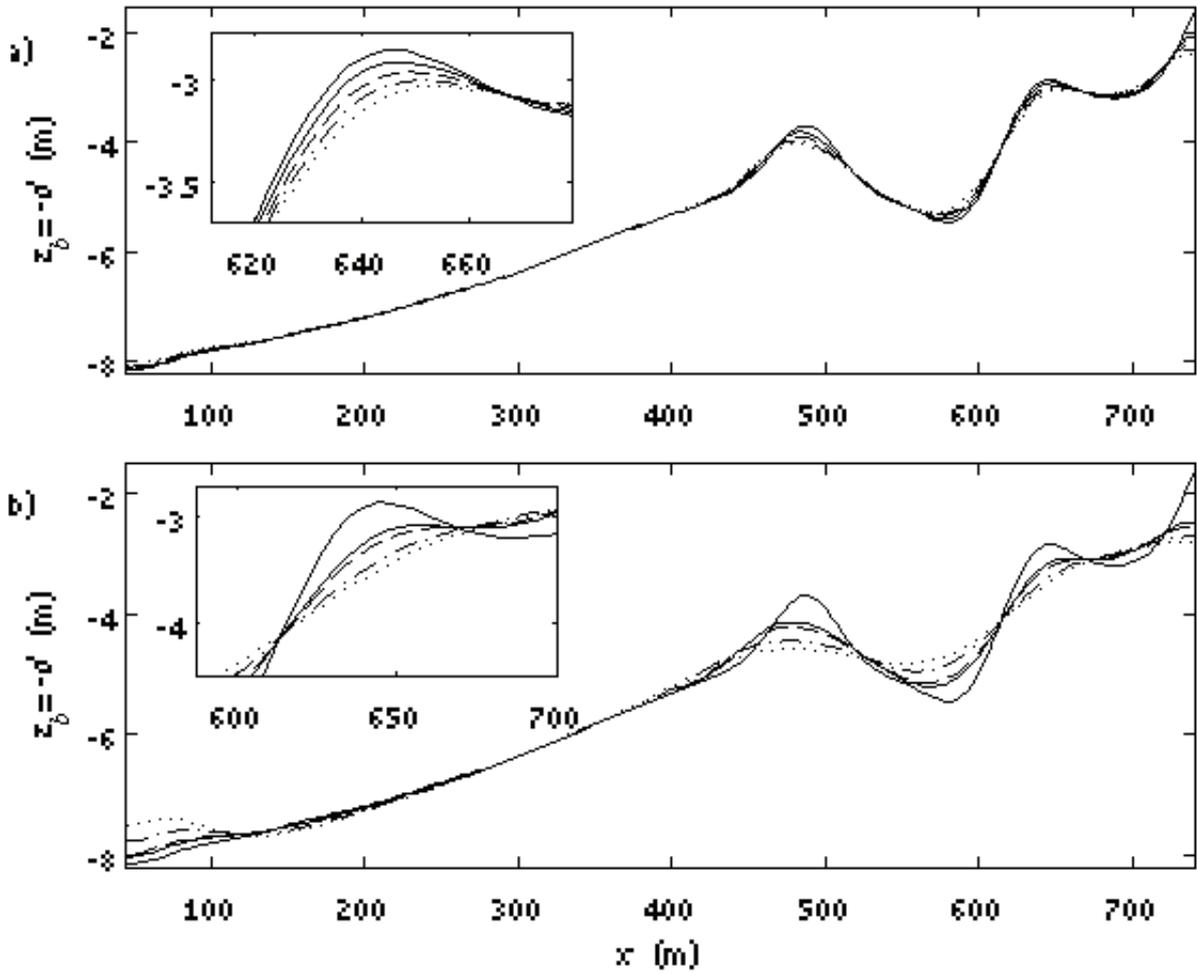


Figure B.11 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-·-) $t=3h$, (···) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-·-) $t=16h$, (···) $t=24h$.

Sète : évolution du fond rechargé – tombant de tempête.

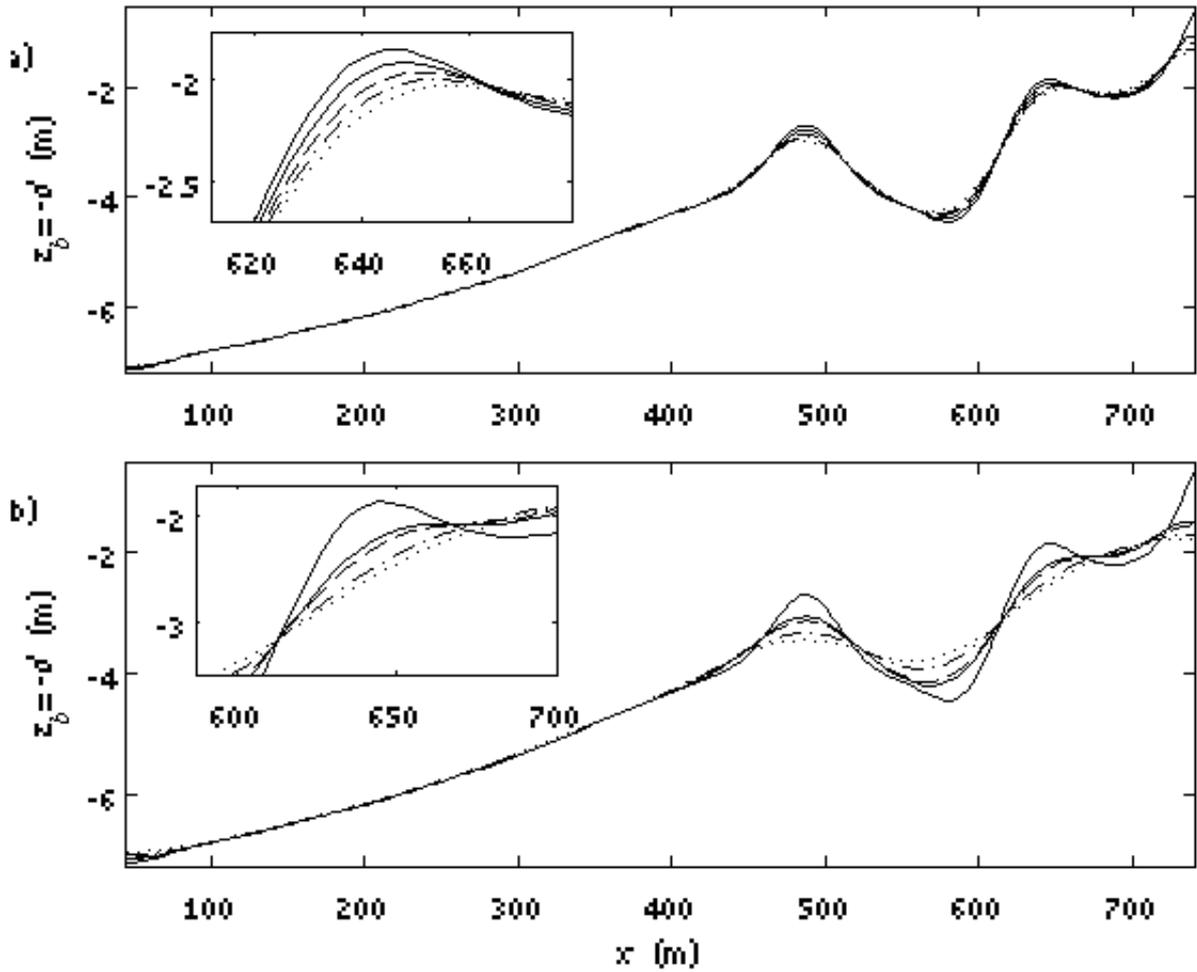


Figure B.12 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1$ h, (- -) $t=2$ h, (-·-) $t=3$ h, (···) $t=4$ h, (b) (—) $t=6$ h, (- -) $t=8$ h, (-·-) $t=16$ h, (···) $t=24$ h.

Sète : évolution du fond à 3 barres – tempête classique.

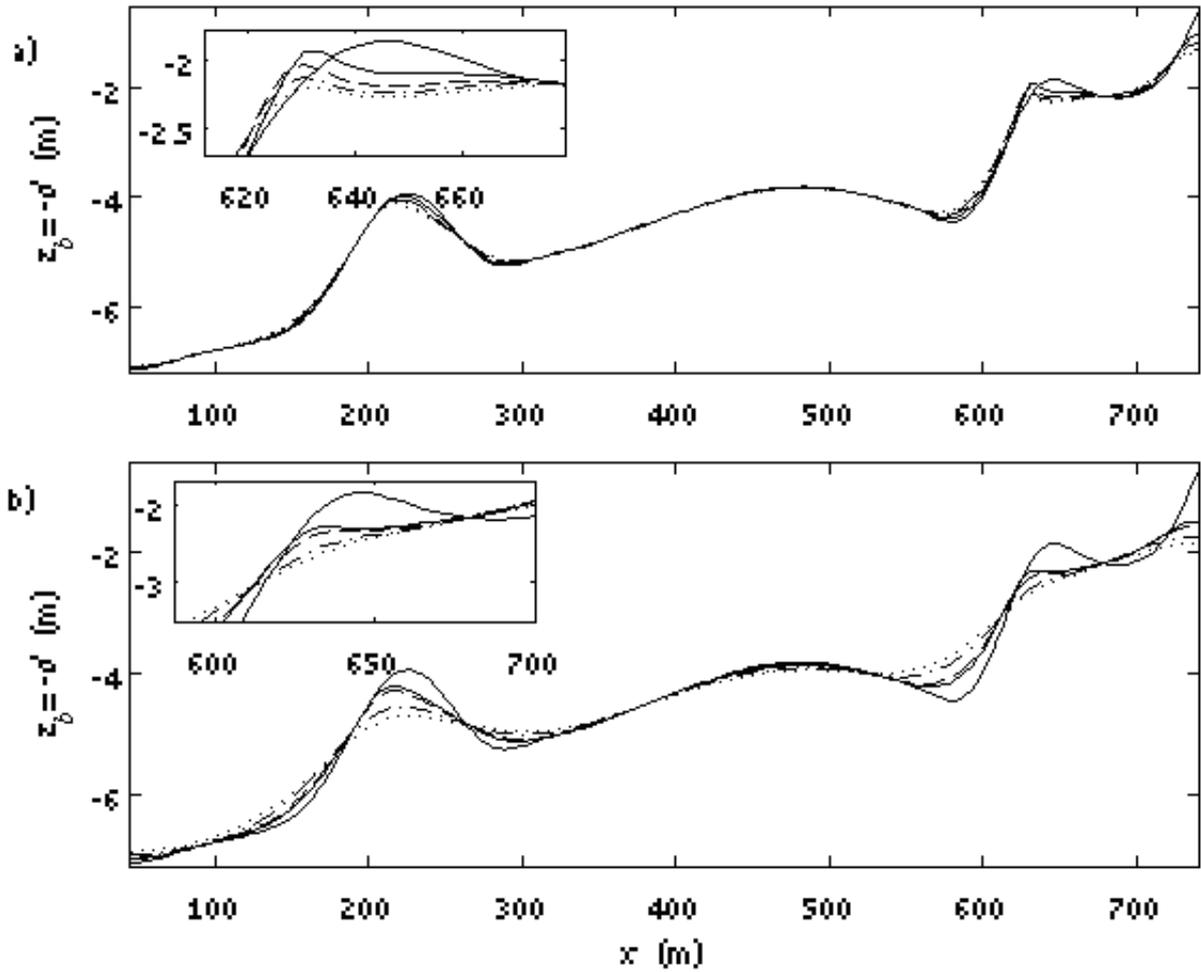


Figure B.13 : Evolution du profil de bathymétrie à 3 barres (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-·-) $t=3h$, (···) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-·-) $t=16h$, (···) $t=24h$.

Sète : évolution du fond à 3 barres – tempête exceptionnelle.

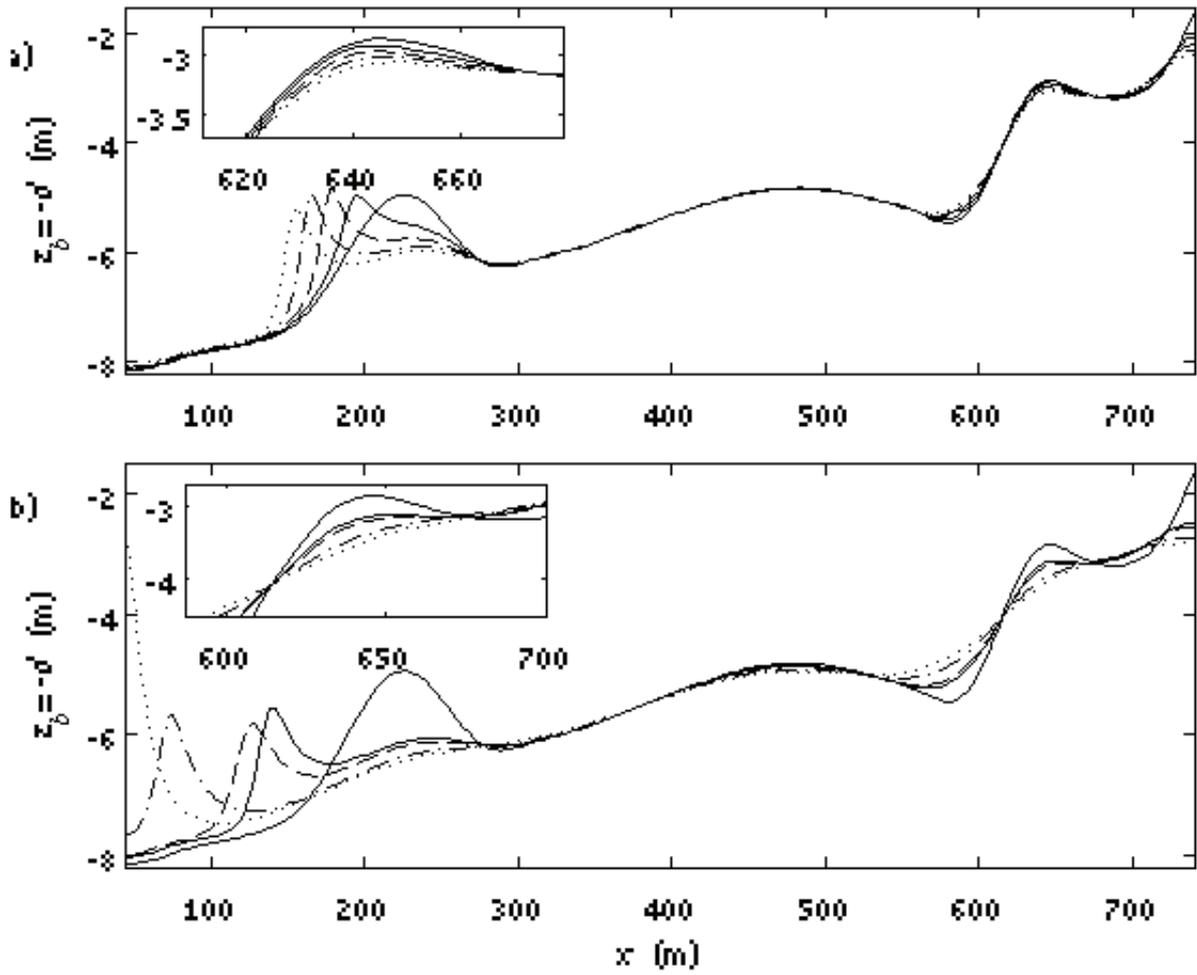


Figure B.14 : Evolution du profil de bathymétrie à 3 barres (—) pour différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-·-) t=3h, (··) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-·-) t=16h, (··) t=24h.

Sète : évolution du fond à 3 barres – tombant de tempête.

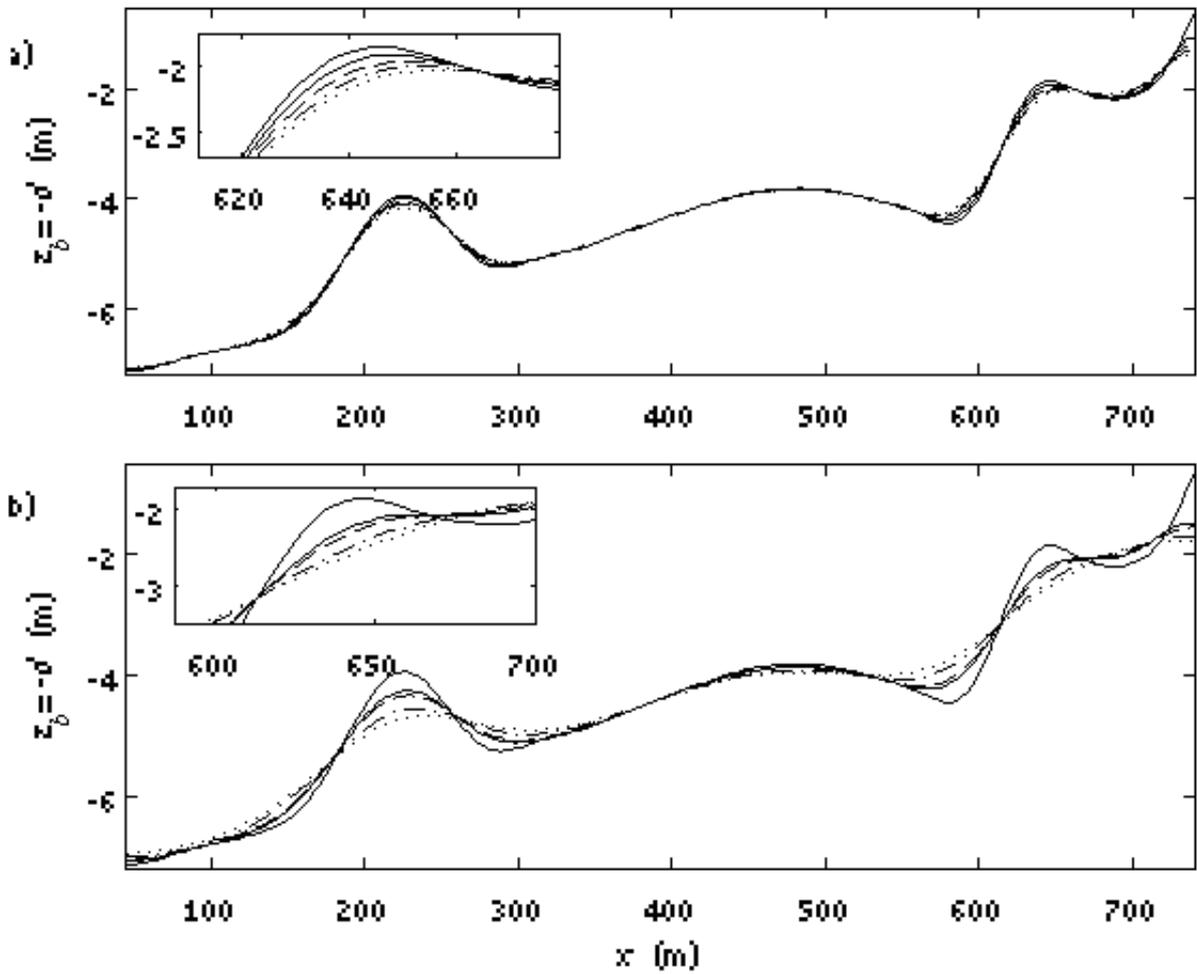


Figure B.15 : Evolution du profil de bathymétrie à 3 barres (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-.-) $t=3h$, (···) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-.-) $t=16h$, (···) $t=24h$.

B. Plage de Leucate.

Les figures de B.16 à B.51 illustrent les résultats obtenus. Les figures B.16 à B.18 illustrent l'ensemble des paramètres calculés (hydrodynamique et transport sédimentaire) sur les profils naturels et rechargés pour les trois scénarios d'agitation pour le profil 3. Les figures B.19 à B.21 montrent l'évolution morphologique du profil naturel sous l'influence des trois scénarios hydrodynamiques retenus pour le profil 3. Les figures B.22 à B.30 illustrent les évolutions morphologiques constatées pour les différents rechargements sur le profil 3 (rechargement de barre externe et deux rechargement surnuméraires à différentes profondeurs) sous les trois conditions de forçage. Les figures B.31 à B.33 illustrent l'ensemble des paramètres calculés sur les profils naturels et rechargés pour les trois scénarios d'agitation pour le profil 7. Les figures B.34 à B.36 montrent l'évolution du profil naturel sous l'influence des trois scénarios hydrodynamiques retenus pour le profil 7. Les figures B.37 à B.42 illustrent les évolutions morphologiques constatées pour les différents rechargements sur le profil 7 (deux rechargements surnuméraires) sous les trois conditions de forçage. Les figures B.43 à B.45 illustrent l'ensemble des paramètres calculés sur les profils naturels et rechargés pour les trois scénarios d'agitation pour le profil 9. Les figures B.46 à B.47 montrent l'évolution du profil naturel sous l'influence des trois scénarios hydrodynamiques retenus pour le profil 9. Les figures B.48 à B.51 illustrent les évolutions morphologiques constatées pour les différents rechargements sur le profil 9 (un rechargement de barre externe et un rechargement surnuméraire) sous les trois conditions de forçage. La situation TE pour le rechargement de barre externe n'a pas pu aboutir car les valeurs de transport sont déjà tellement élevées en début de simulations que le modèle est inopérant.

P3 (profil transversal au niveau d'une corne de feston externe)

Evolution des paramètres hydro-sédimentaires

Le déferlement est important dès que l'on arrive sur le système externe (Fig. B.16 à B.18). **Les diminutions les plus fortes d'énergie à la côte sont à attribuer au rechargement de barre externe** (cas intitulé rechargement de fond 2) pour toutes les situations hydrodynamiques. Le transport est alors majoritairement dirigé vers le large au niveau du rechargement, sauf pour la situation de tombant de tempête (Fig. B.18) On voit ici que le flux est significativement orienté vers la plage (entre la barre et la plage) lors du TT, pour le rechargement 2 qui consiste à recharger la barre externe.

Evolutions morphologiques constatées

Evolution du profil naturel

L'évolution du profil naturel aux conditions de forçages reste **peu importante** en particulier pour le tombant de tempête et la tempête classique (Fig. B.19 et B.21). On observe cependant un **lissage de la barre interne et un comblement de la fosse interne au bout des temps les plus longs de la simulation**. Pour le forçage maximum TE (Fig. B.20), on remarque une exportation du matériel de la barre externe vers le large alors que la barre interne s'affaisse et que la fosse interne tend à se combler. Ces évolutions restent cependant décimétriques en z.

Evolution du fond rechargé 1 (revers barre externe) :

Peu d'évolutions sont constatées (Fig. B.22 à B.24). On reste en similitude avec ce qui était observé pour le profil naturel (lissage de la partie la plus haute du profil), **sauf pour TE où la barre externe n'est plus érodée.**

Evolution du fond rechargé 2 (barre externe) :

Pour TC (Fig. B.25), on observe une érosion du rechargement et toujours lissage du profil interne. La tendance est encore plus forte pour TE (Fig. B.26). Peu de modifications sont constatées pour TT au niveau du rechargement (Fig. B.27). Alors que les paramètres hydrodynamiques pour ce cas (Fig. B.16 à B.18) sont ceux qui indiquent la plus grosse diminution d'énergie au niveau du système interne, on n'observe pas d'évolutions morphologiques très favorables en bas de plage, on reste plutôt en similitude avec le cas naturel, le bas de plage de plage ne présentant pas de forte érosion.

Evolution du fond rechargé 3 (surnuméraire) :

Pour TC et TT on observe peu de modifications (Fig. B.28 et B.30). Idem pour TE avec en plus érosion et recul de la barre externe (Fig. B.29). Un effet de bord peut être observé qui se traduit par une accumulation de bas plage émergé en relation avec un flux de sédiment vers la côte mais les résultats obtenus par le modèle sur les limites du domaine doivent être considérés comme peu fiables.

P7 (profil transversal intermédiaire entre une corne et un ventre externe)

Evolution des paramètres hydro-sédimentaires

Dans le cas présent le profil est différent de P3, ce qui amène des modifications importantes vis-à-vis des paramètres hydro-sédimentaires. Une forte dissipation se produit toujours à partir de l'entrée sur le revers du système externe pour TC et TE, mais le transport induit à la côte est tantôt dirigé vers la côte pour TC (Fig. B.31), tantôt vers le large pour TE (Fig. B.32). L'énergie qui arrive à la côte n'est pas sensiblement diminuée pour les cas de rechargement. Pour TT (Fig. B.33), les rechargements ne changent pas les conditions hydro-sédimentaires par rapport à la situation du profil naturel pour lequel on constate une dissipation très près du bord avec un transport dirigé vers la côte.

Evolutions morphologiques constatées

Evolution du profil naturel

Pour le profil naturel, on observe peu d'évolution, comme pour P3. Les faibles modifications suivent la même tendance que pour P3, à savoir un lissage de la barre interne au bout des temps de simulations les plus longs et un comblement de la fosse interne (Fig. B.34 et B.36). L'effet de la TE sur la barre externe (Fig. B.35) est cependant moins marqué en raison du caractère plus profond de la position de la crête par rapport à P3. Il semblerait (Fig. B.31c) qu'il puisse y avoir un transport dirigé vers la côte sur la base de l'analyse du flux sédimentaire.

Evolution du fond rechargé 1 (revers barre externe) :

On constate peu d'évolution (Fig. B.37 à B.39), avec une érosion marquée du rechargement pour TE (Fig. B.38). On reste en similitude avec ce qui était observé pour le profil naturel.

Evolution du fond rechargé 3 (surnuméraire) :

Pour TC et TT peu de modifications (Fig. B.40 à B.42). Idem pour TE avec **absence d'érosion de la barre externe contrairement au cas naturel.**

P9 (profil transversal au niveau d'un ventre de feston externe)

Evolution des paramètres hydro-sédimentaires

On remarque pour TE et TC (Fig. B.43 et B.44) une forte diminution de la hauteur de houle dès la barre externe si celle-ci est rechargée. Pour le rechargement surnuméraire, l'évolution des paramètres hydro-sédimentaires suit la même tendance que le cas naturel sans rechargement. La brisance sur la barre externe induit un transport important vers le large à ce niveau du profil. Pour TT (Fig. B.45), on se rapproche de la situation observée pour P7, à savoir une dissipation d'énergie très près du bord quelles que soient les conditions énergétiques, **avec une augmentation du transport vers la côte dans la situation de rechargement de barre externe.**

Evolutions morphologiques constatées

Evolution du profil naturel

Pour le profil naturel (Fig. B.46 à B.47), toujours peu d'évolution (faible lissage de la barre interne avec comblement de la fosse interne) mais avec en plus une tendance très légère à l'érosion de la barre externe et au comblement de la fosse externe. L'engraissement de la plage est certainement un artéfact en bordure du domaine.

Evolution du fond rechargé 1 (barre externe) :

Légère érosion du rechargement qui augmente la hauteur de la crête de barre de manière conséquente (Fig. B.48 à B.49). L'engraissement de la plage est certainement un artéfact en bordure du domaine.

Evolution du fond rechargé 3 (surnuméraire) :

TC et TT peu de modifications par rapport au cas naturel (Fig. B.50 et B.51). L'engraissement de la plage est certainement un artéfact en bordure du domaine.

Synthèse

Les évolutions morphologiques sont peu importantes pour l'ensemble des profils, même pour le cas naturel sans rechargement. Ceci est moins vrai lorsqu'on va vers les temps de simulation les plus longs et lorsqu'on applique des conditions énergétiques exceptionnelles, on observe alors un lissage du système interne. Plus les rechargements sont réalisés proches de la crête de la barre externe, plus les rechargements sont favorables au système interne en terme de diminution de l'énergie qui arrive à la côte et orientation du transport sédimentaire. Les rechargements de barre externe induisent le plus de dissipation d'énergie. Cependant la traduction en terme d'évolution de morphologie n'est pas significative. Les rechargements surnuméraires permettent par ailleurs une diminution de l'érosion au niveau des barres externes. Dans l'ensemble les rechargements contribuent à de petites améliorations du comportement des profils, comme la diminution de l'érosion des barres externes ou encore la création de courants dirigés vers la côte, sans pour autant induire des transports vers la côte systématiquement.

En conclusion

Le système naturel à Leucate est déjà relativement stable pour les différentes conditions de forçages. Ceci est en concordance avec les observations *in-situ* qui ont pu être menées ces dernières années. Rajouter une barre surnuméraire ne semble pas avoir un effet que sur la diminution de l'érosion de la barre interne. Le rechargement de barre externe semble plus favorable en regardant les paramètres hydro-sédimentaires mais cela ne se traduit pas de manière très visible sur les évolutions morphologiques constatées du système interne. Le modèle Modhys ne semble pas montrer que les rechargements d'avant-côte soient très efficaces pour le site de Leucate en dehors que quelques améliorations de comportement des barres.

Comparaison de la réponse aux rechargements pour les avant-côtes de Sète/Leucate pour le modèle Modhys

Le site de Leucate est beaucoup moins mobile que le site de Sète que ce soit pour les situations avec ou sans rechargement. Ceci concorde avec les observations de terrains.

D'une manière générale, les rechargements semblent plus favorables au site de Sète que celui de Leucate : les rechargements surnuméraires en conditions de forçage exceptionnelles semblent plus efficaces à Sète, la minoration de l'érosion à la côte semble plus marquée pour l'ensemble des rechargements. Ceci est certainement à attribuer à la pente moyenne de chacun des sites.

Le modèle décrit le plus d'évolution morphologique au niveau du système interne, qui se traduit généralement par une érosion et un lissage du profil.

Pour les deux sites, pour les temps de simulation les plus courts les rechargements peuvent être favorables ou retarder l'érosion. Par contre, si on simule des tempêtes jusqu'à 24h, les rechargements apparaissent nettement moins favorables.

Dans les deux cas, le rechargement de barre externe semble le plus favorable.

Comparaison Sète/Leucate pour Modhys avec résultats obtenus par le même modèle sur d'autres sites de l'Hérault (Programme GESA Beachmed-e)

Dans le programme Beachmed-e Gesa, quatre avant-côtes du littoral de l'Hérault ont été étudiées : Petit-Travers, Maguelonne, Ingril et Vendres. On a conclu qu'à l'échelle de temps de la tempête de 24h, les simulations réalisées à l'aide de Modhys ne semblent pas très favorables aux rechargements d'avant-côte. Les rechargements par création d'une barre surnuméraire ne jouent qu'un rôle très faible de brise-lame immergé, alors que les rechargements directement sur la barre externe semblent eux plus favorables en terme de dissipation de l'énergie et de transport de sédiment vers la côte. On est donc en similitude avec ce qu'on a pu observer dans Liteau II.

On peut aussi noter dans Beachmed-e que les conditions initiales du profil de plage jouent un grand rôle et qu'on peut observer des comportements différents du système interne en fonction de la forme initiale du profil d'avant-côte. Il apparaît dès lors que toute généralisation est difficile et que chaque cas d'étude reste un cas d'étude particulier. On est là encore en bon accord avec ce qui peut observer dans Liteau II, avec deux sites, Sète et Leucate, qui ont des comportements qui peuvent varier et des réponses de profils différentes.

Leucate – profil 3 : tempête classique.

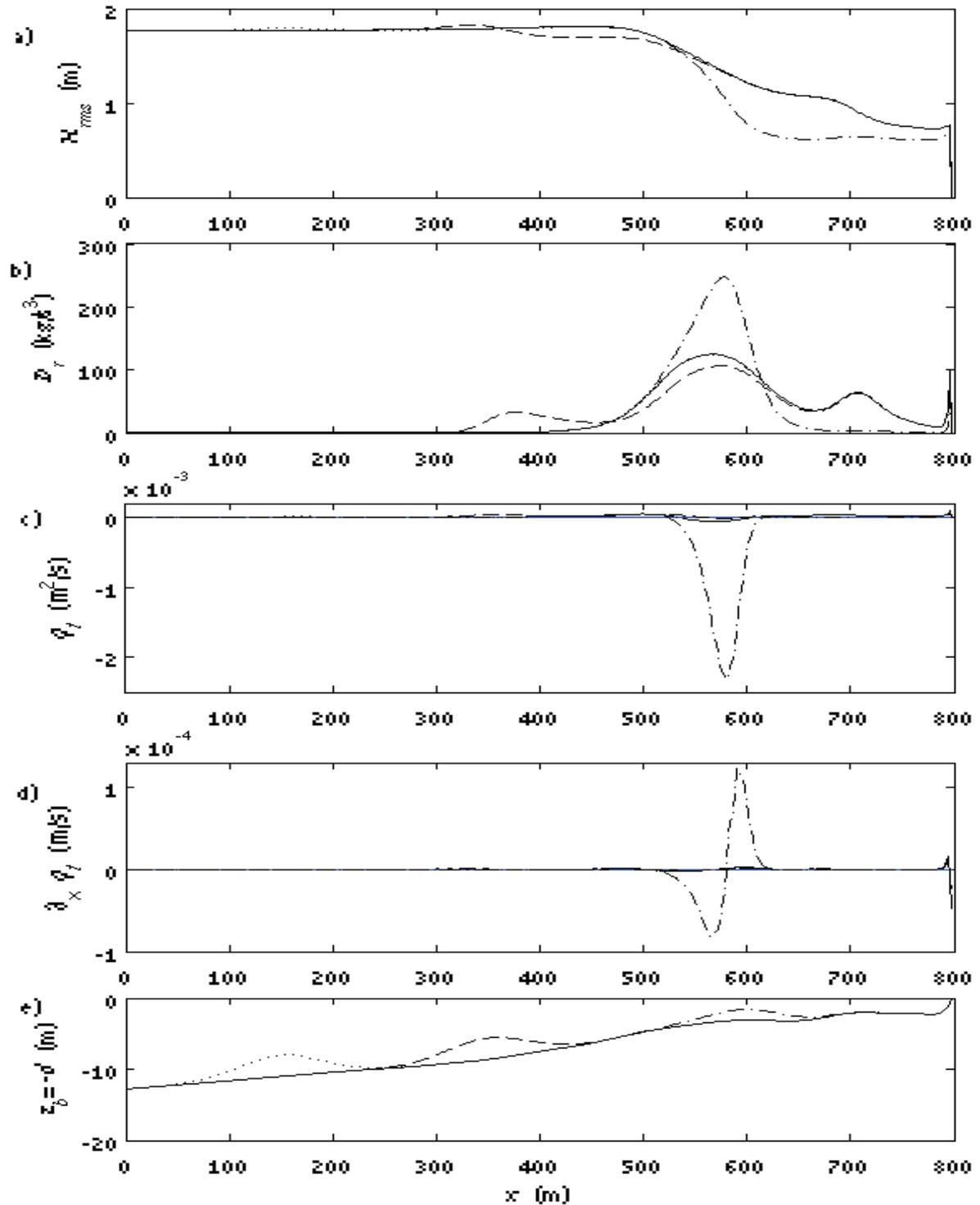


Figure B.16 : Profils de (a) hauteur de houle $H_{rms}(x)$, (b) taux de dissipation du rouleau de déferlement $D_r(x)$, (c) flux total de sédiment q_t , (d) gradient horizontal du flux total de sédiment $\partial_x q_t$, (e) (---) fond initial, (-) fond rechargé 1, (-.-) fond rechargé 2, (...) fond rechargé 3.

Leucate – profil 3 : tempête exceptionnelle.

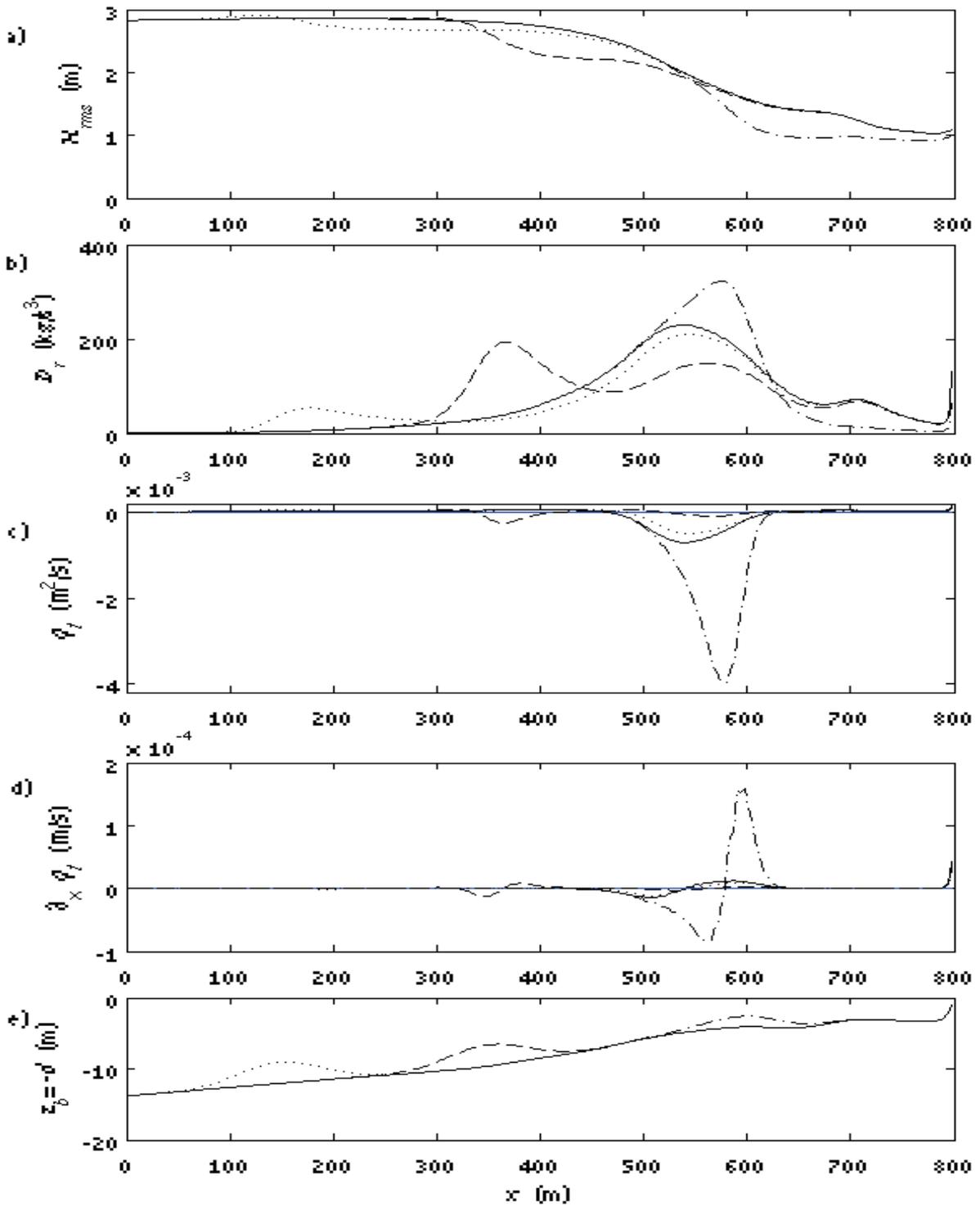


Figure B.17 : Profils de (a) hauteur de houle $H_{rms}(x)$, (b) taux de dissipation du rouleau de déferlement $D_r(x)$, (c) flux total de sédiment q_t , (d) gradient horizontal du flux total de sédiment $\partial_x q_t$, (e) (---) fond initial, (- -) fond rechargé 1, (-.-) fond rechargé 2, (...) fond rechargé 3.

Leucate – profil 3 : tombant de tempête.

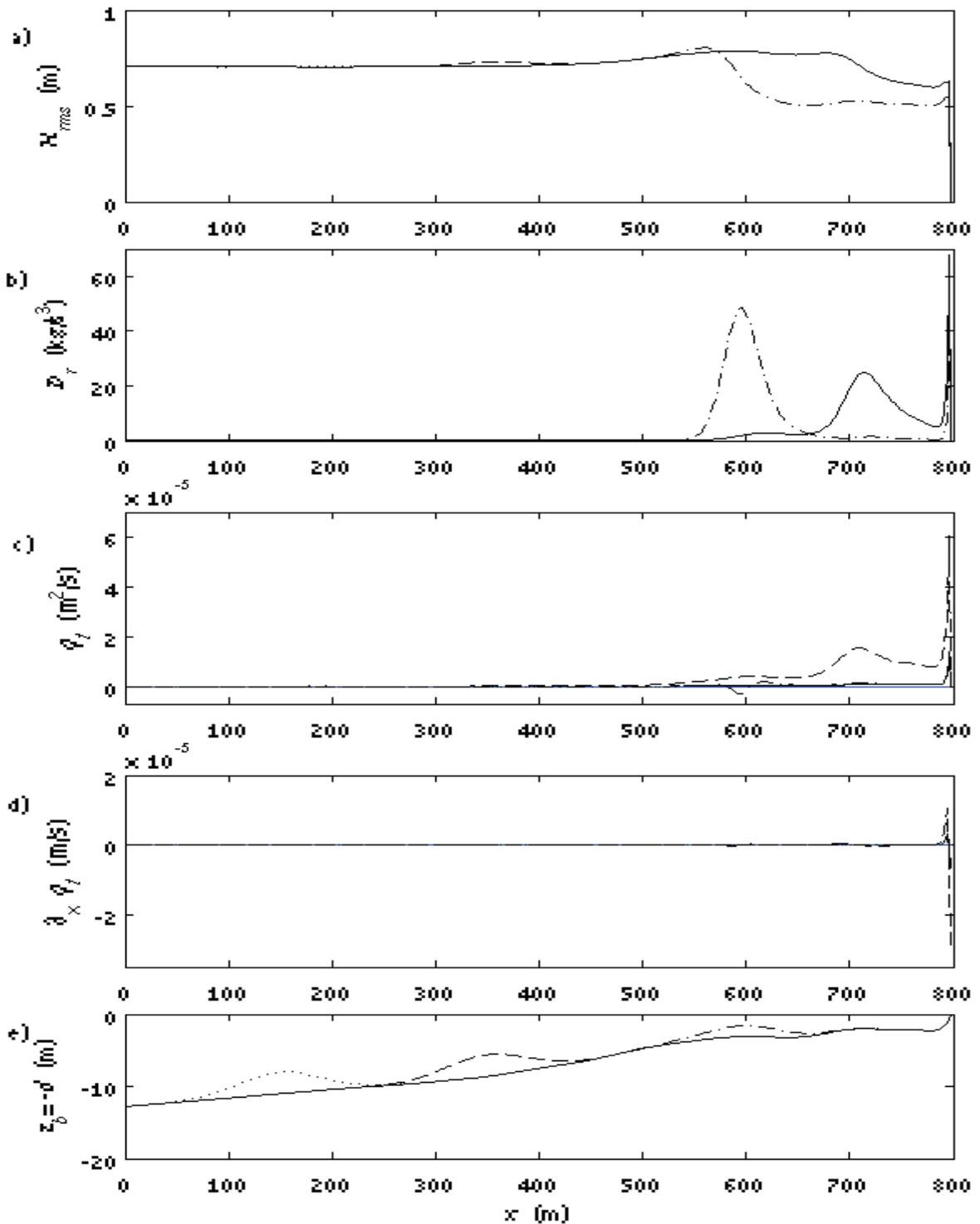


Figure B.18 : Profils de (a) hauteur de houle $H_{rms}(x)$, (b) taux de dissipation du rouleau de déferlement $D_r(x)$, (c) flux total de sédiment q_t , (d) gradient horizontal du flux total de sédiment $\partial_x q_t$, (e) (---) fond initial, (- -) fond rechargé 1, (-.-) fond rechargé 2, (...) fond rechargé 3.

Leucate – profil 3 : évolution du fond initial – tempête classique.

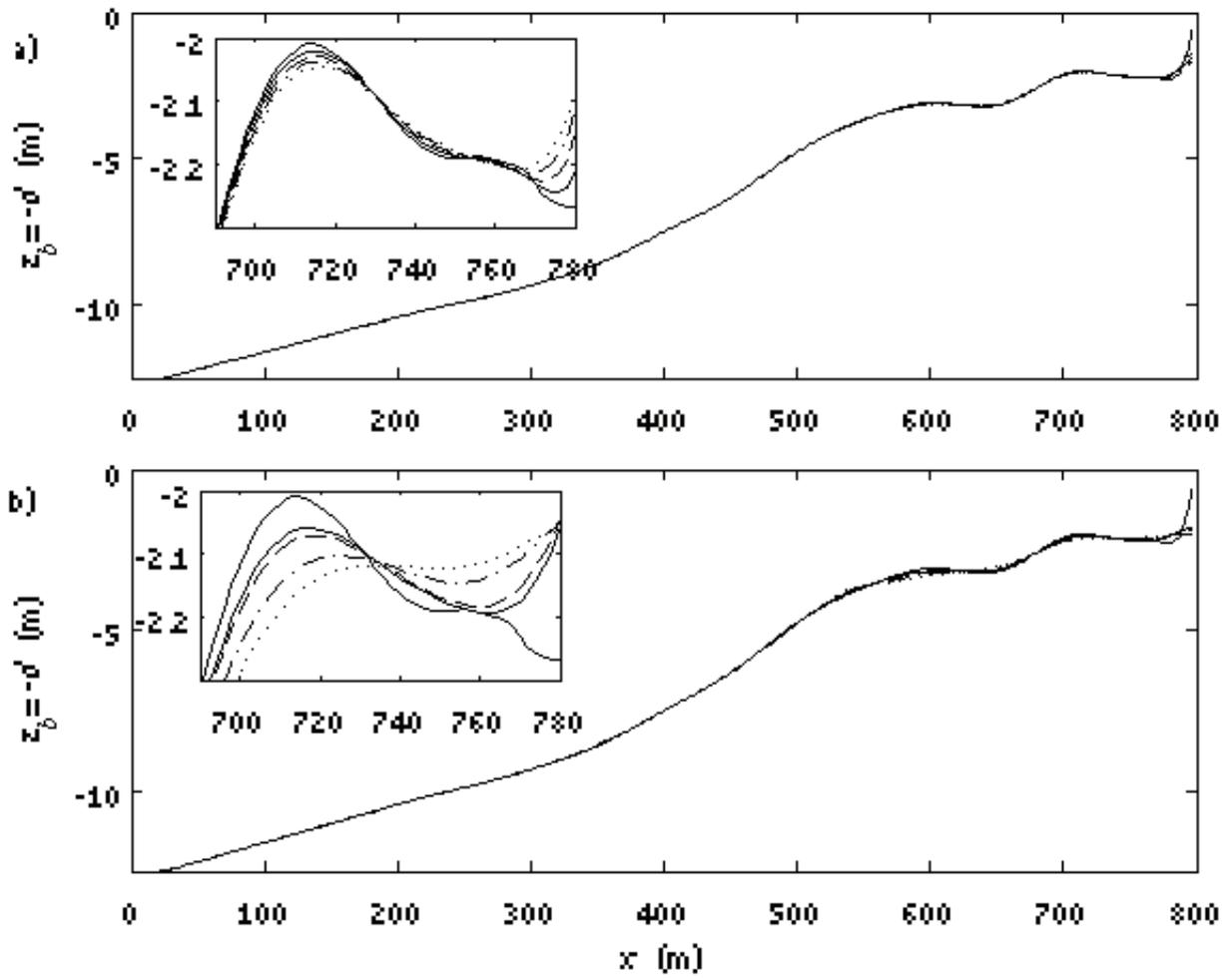


Figure B.19 : Evolution du profil de bathymétrie initial (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-·-) $t=3h$, (···) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-··) $t=16h$, (···) $t=24h$.

Leucate – profil 3 : évolution du fond initial – tempête exceptionnelle.

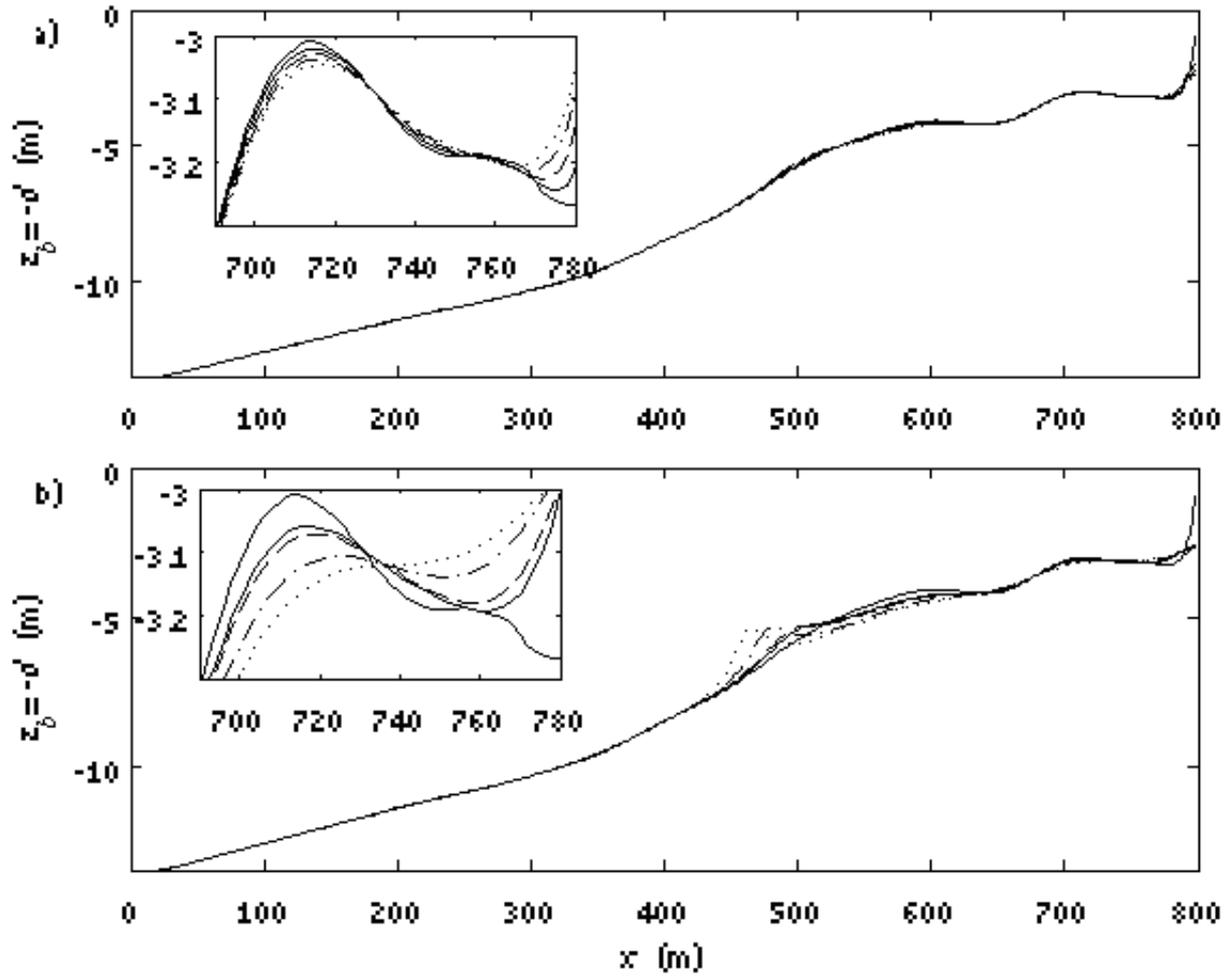


Figure B.20 : Evolution du profil de bathymétrie initial (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-.-) $t=3h$, (...) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-.-) $t=16h$, (...) $t=24h$.

Leucate – profil 3 : évolution du fond initial – tombant de tempête.

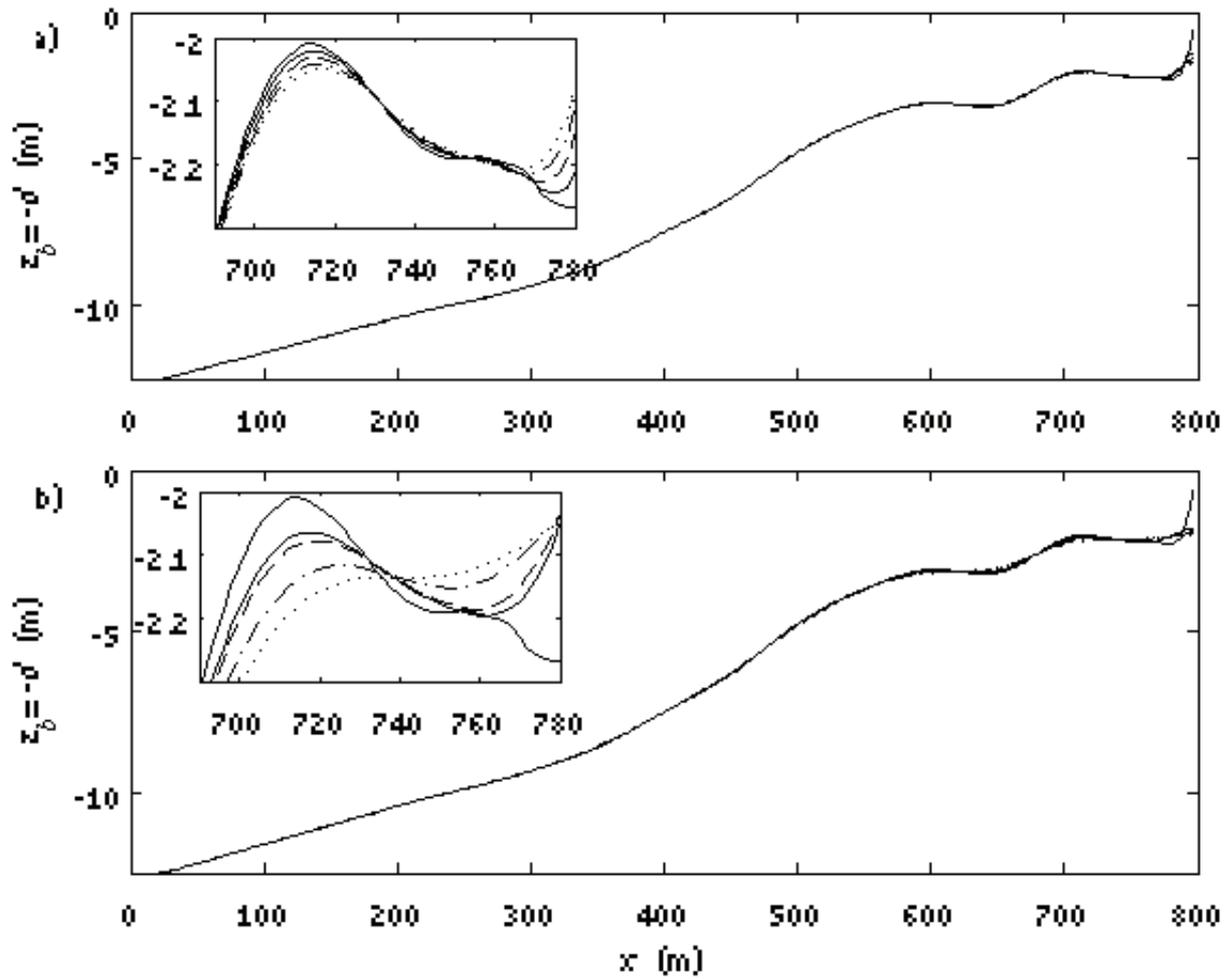


Figure B.21 : Evolution du profil de bathymétrie initial (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-·-) $t=3h$, (··) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-·-) $t=16h$, (··) $t=24h$.

Leucate – profil 3 : évolution du fond rechargé 1 – tempête classique.

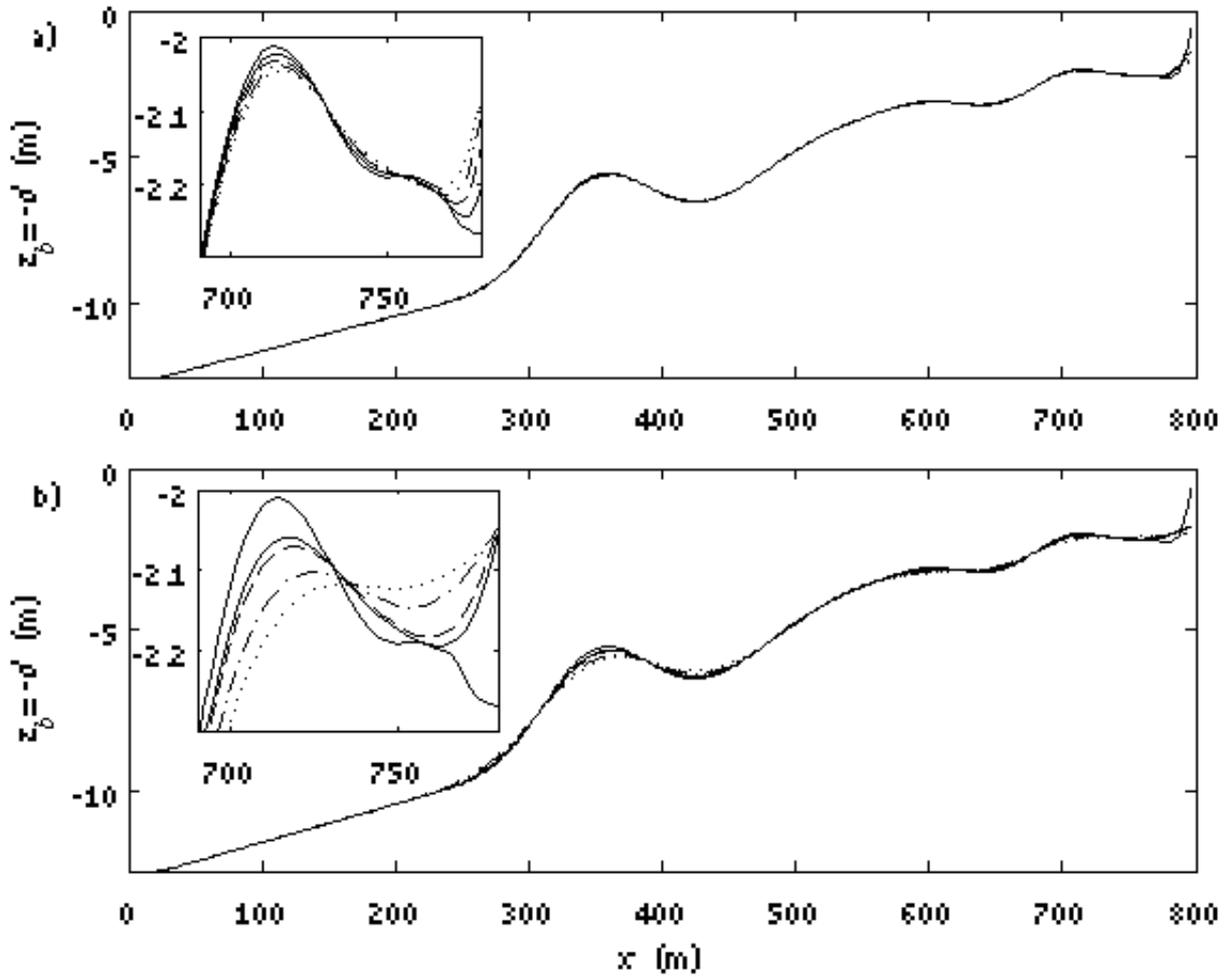


Figure B.22 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé 1 (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-·-) $t=3h$, (···) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-·-) $t=16h$, (···) $t=24h$.

Leucate – profil 3 : évolution du fond rechargé 1 – tempête exceptionnelle.

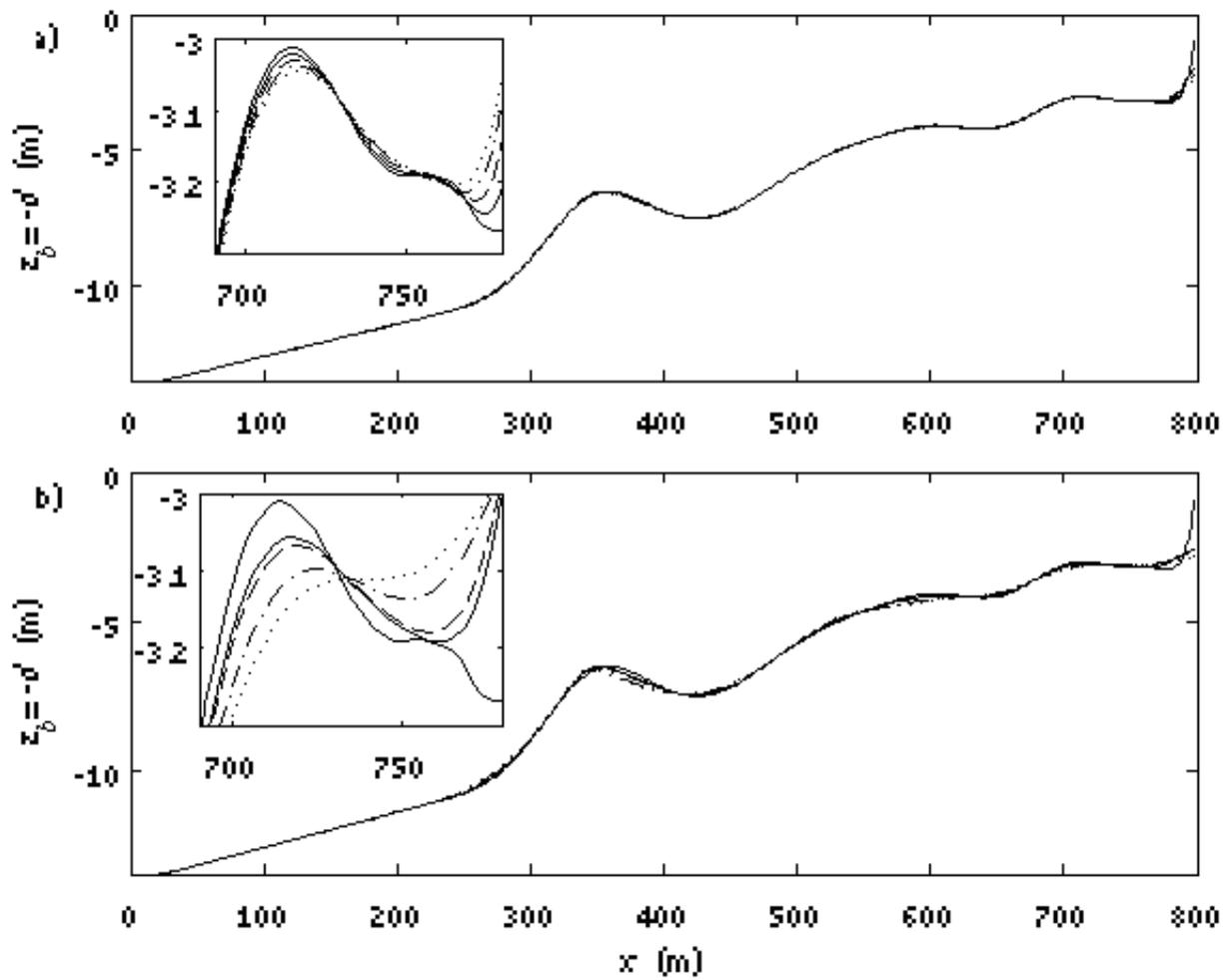


Figure B.23 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé 1 (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-·-) $t=3h$, (···) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-·-) $t=16h$, (···) $t=24h$.

Leucate – profil 3 : évolution du fond rechargé 1 – tombant de tempête.

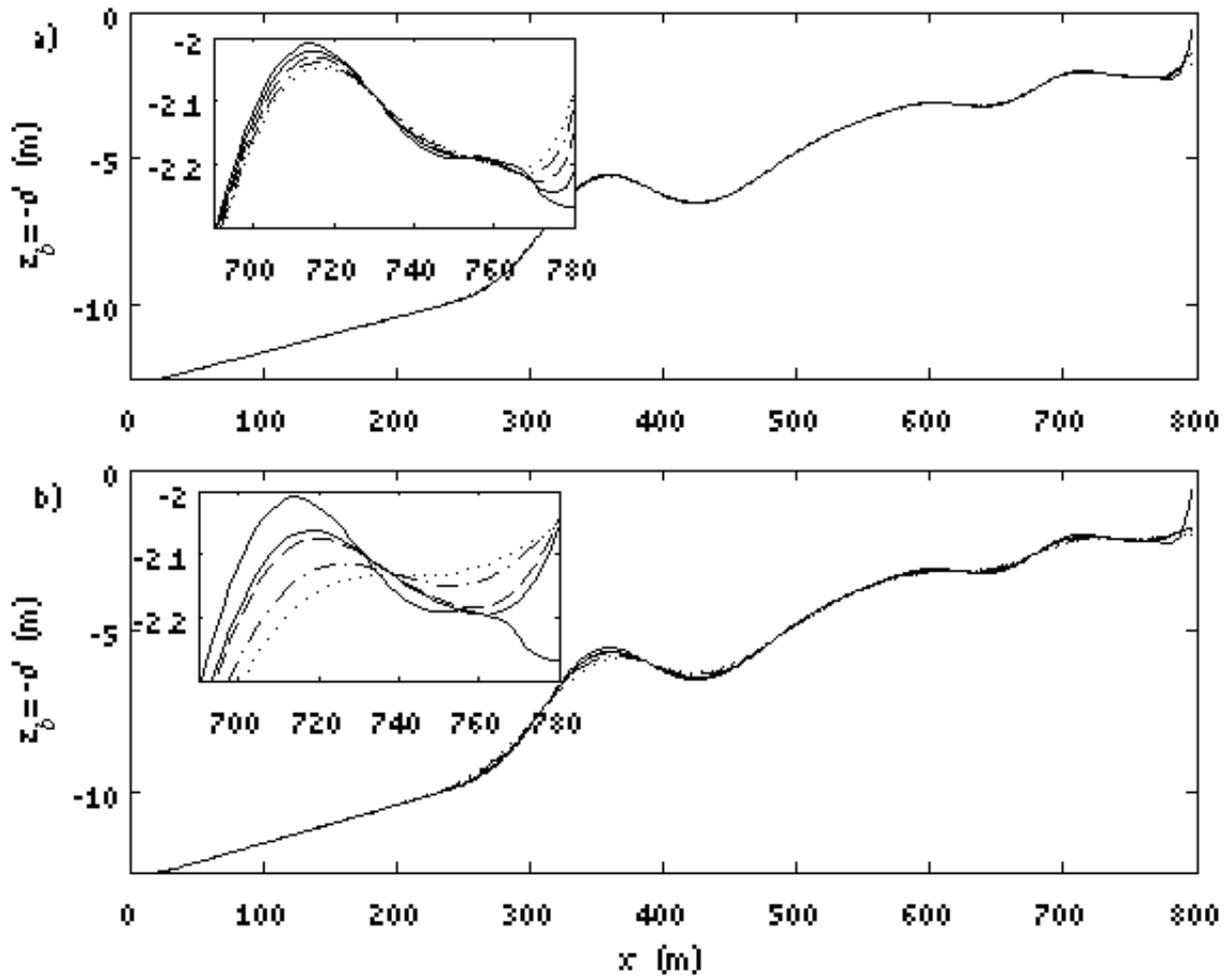


Figure B.24 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé 1 (—) pour différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-·-) t=3h, (···) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-·-) t=16h, (···) t=24h.

Leucate – profil 3 : évolution du fond rechargé 2 – tempête classique.

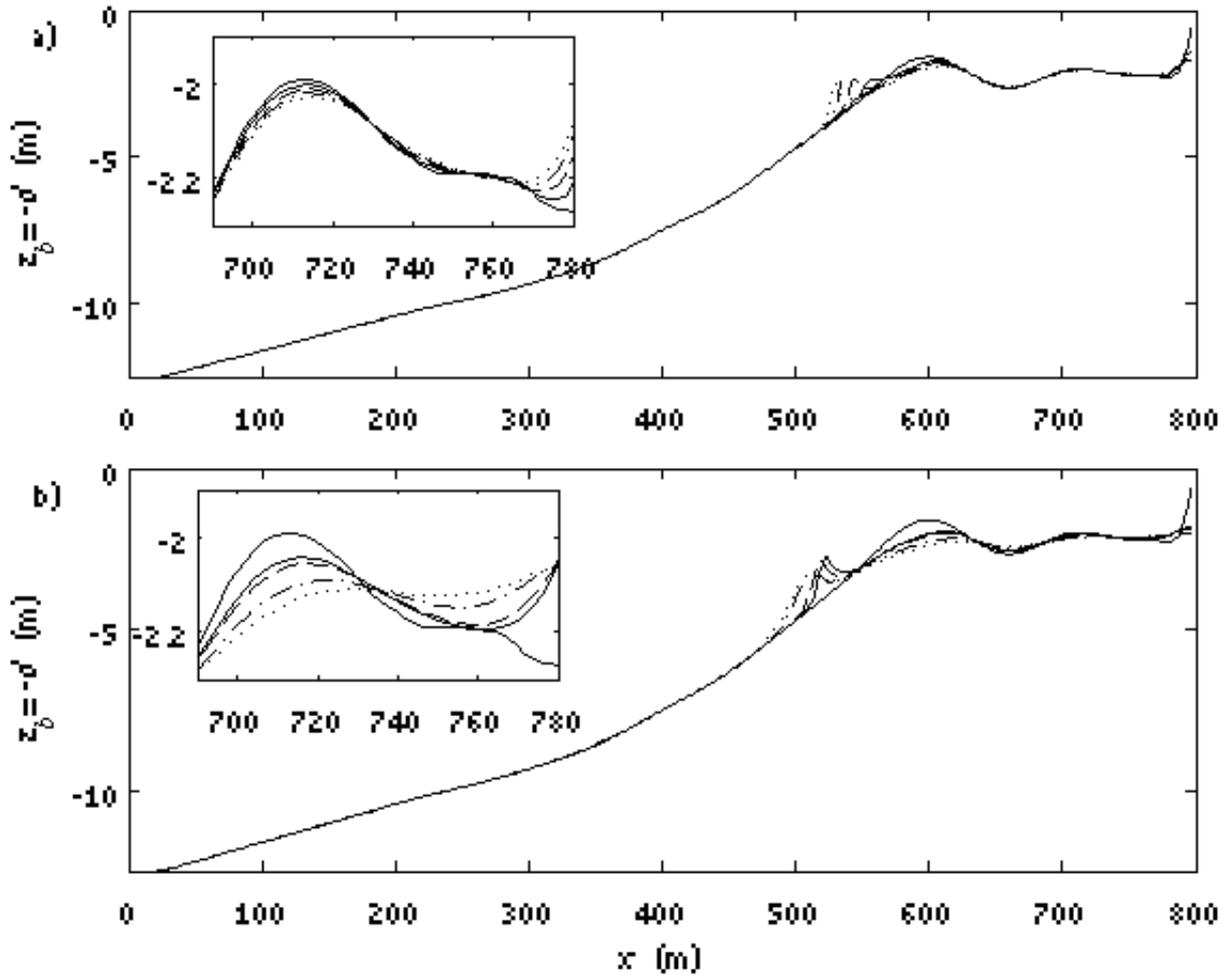


Figure B.25 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé 2 (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-·-) $t=3h$, (···) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-·-) $t=16h$, (···) $t=24h$.

Leucate – profil 3 : évolution du fond recharge 2 – tempête exceptionnelle.

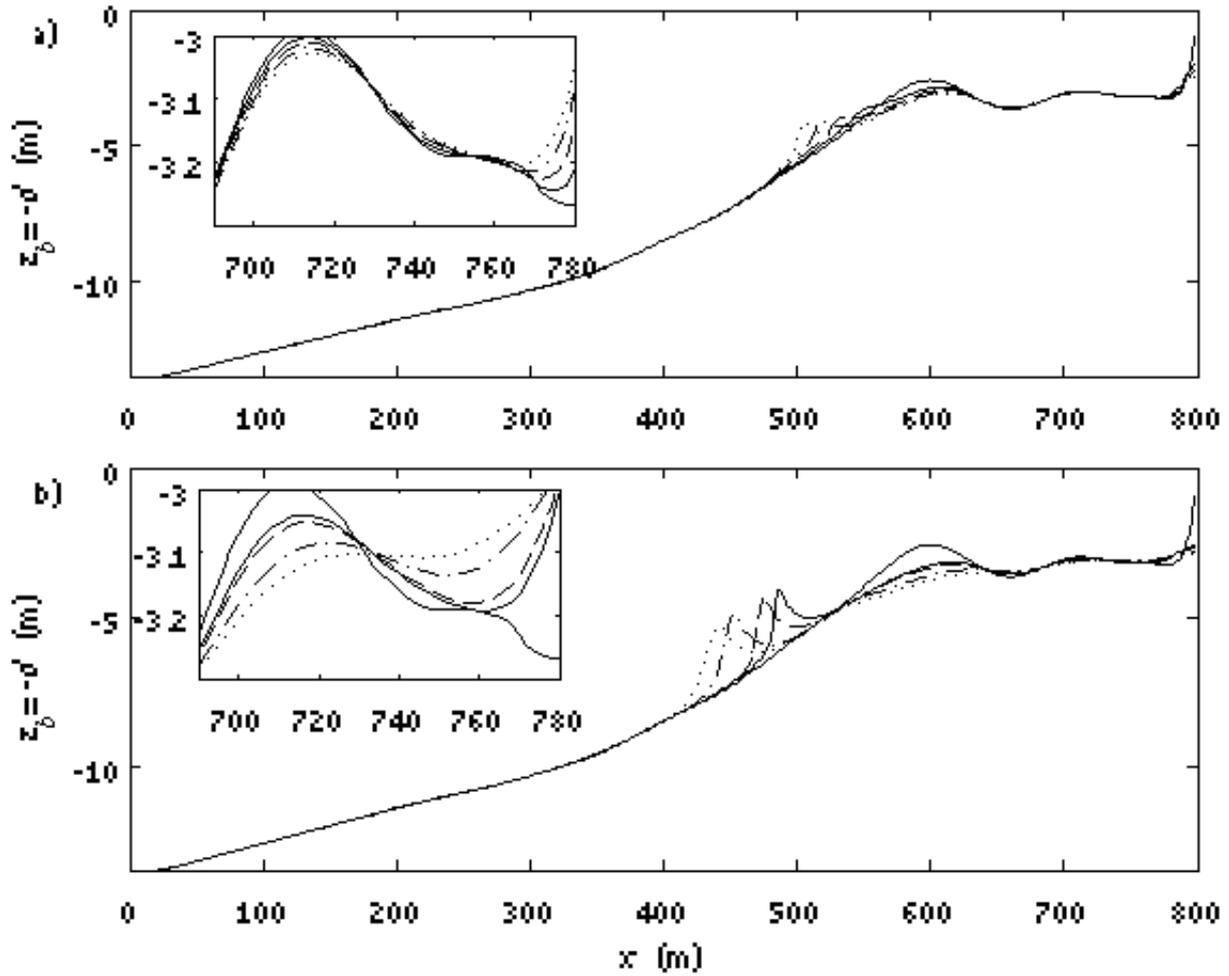


Figure B.26 : Evolution du profil de bathymétrie recharge 2 (—) pour différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-·-) t=3h, (···) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-·-) t=16h, (···) t=24h.

Leucate – profil 3 : évolution du fond rechargé 2 – tombant de tempête.

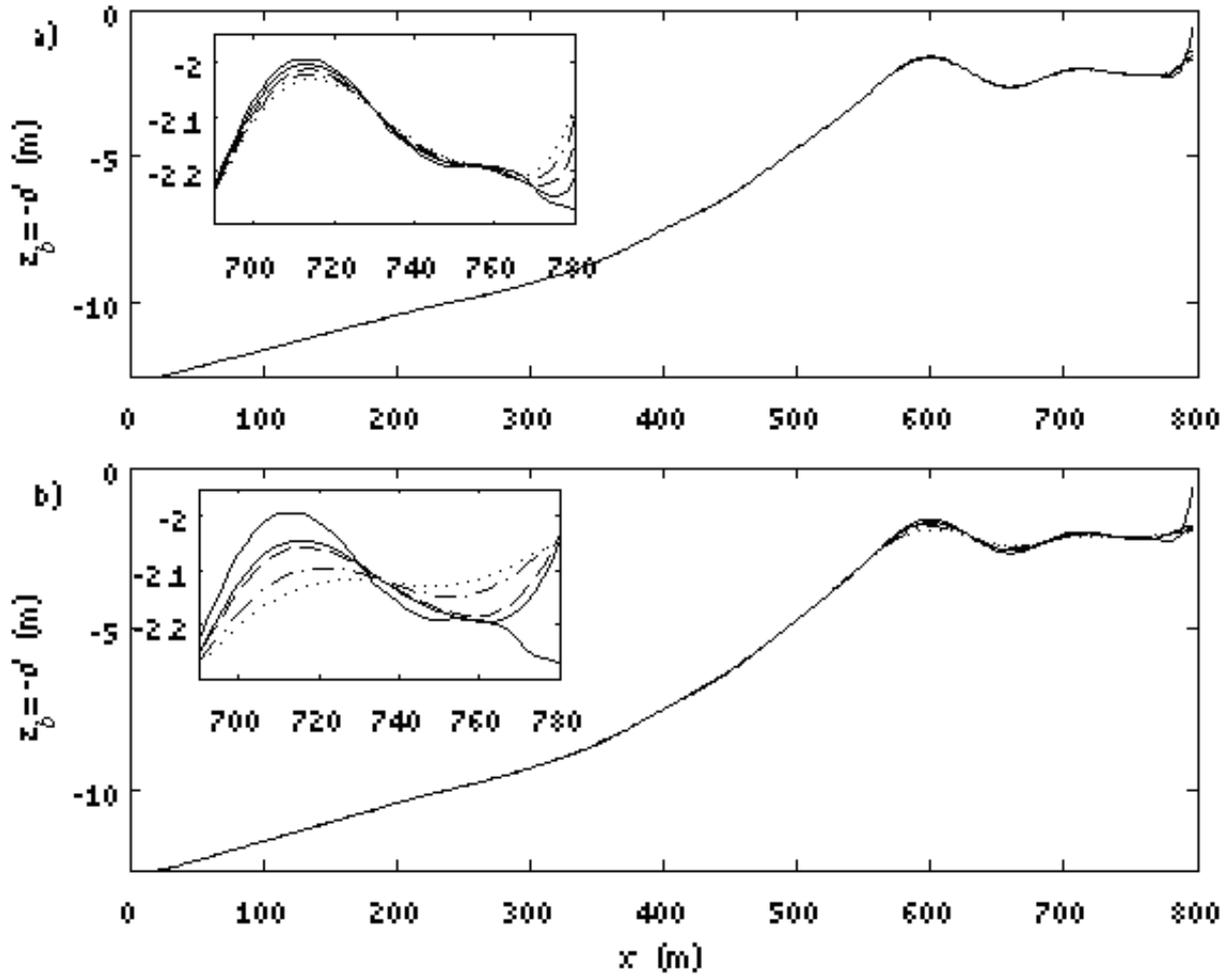


Figure B.27 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé 2 (—) pour différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-·-) t=3h, (···) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-·-) t=16h, (···) t=24h.

Leucate – profil 3 : évolution du fond rechargé 3 – tempête classique.

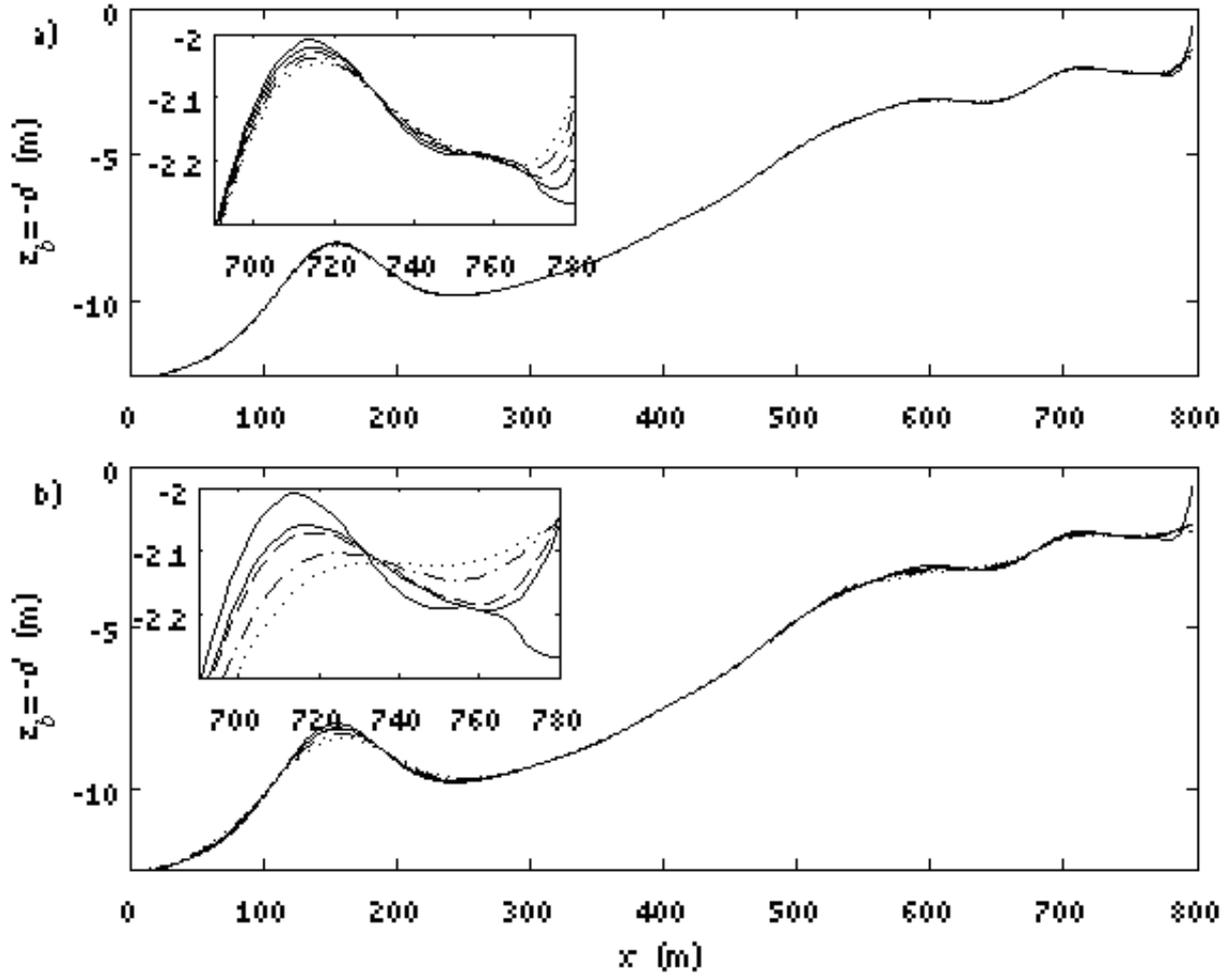


Figure B.28 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé 3 (—) pour différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-·-) t=3h, (···) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-·-) t=16h, (···) t=24h.

Leucate – profil 3 : évolution du fond rechargé 3 – tempête exceptionnelle.

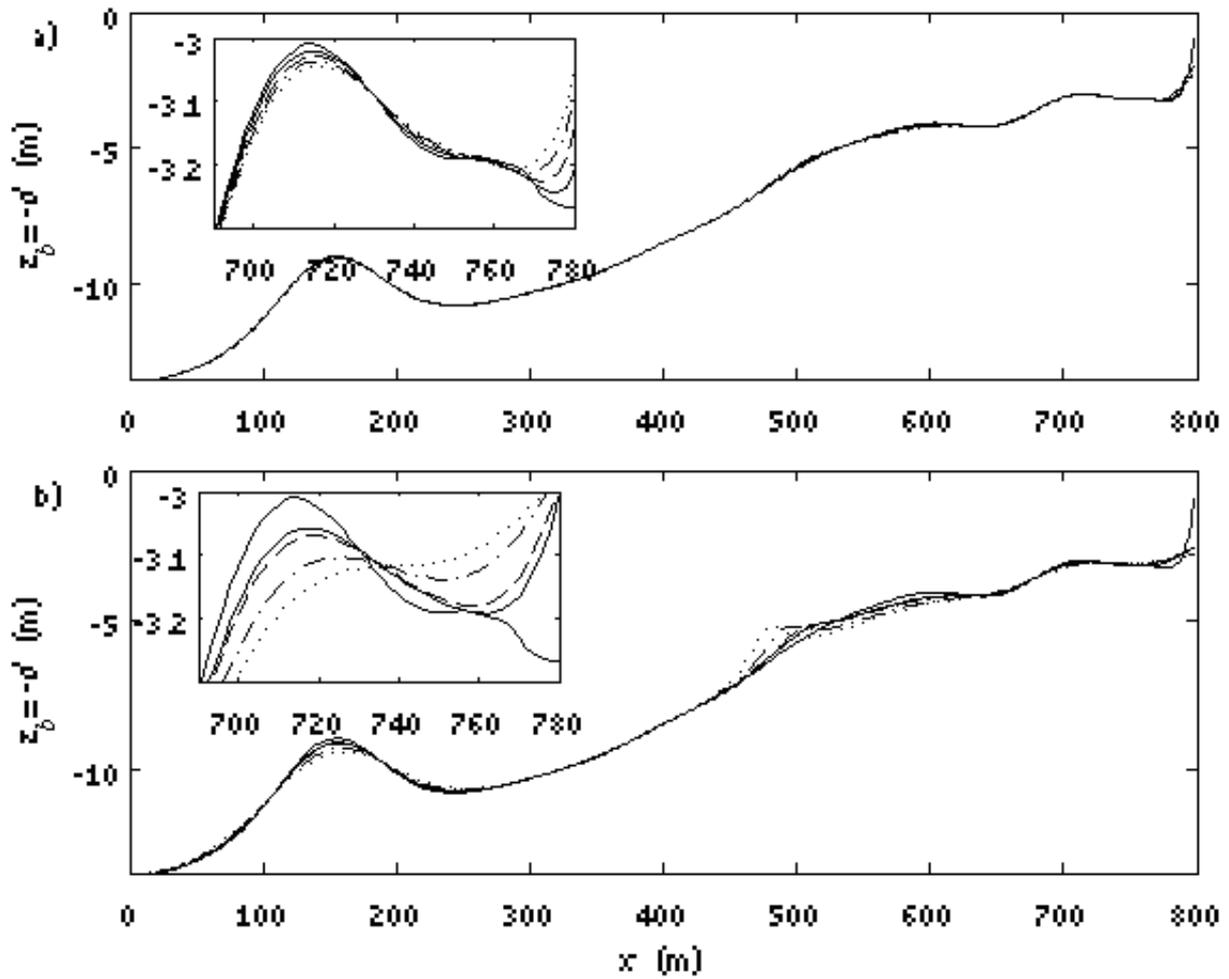


Figure B.29 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé 3 (—) pour différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-·-) t=3h, (···) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-·-) t=16h, (···) t=24h.

Leucate – profil 3 : évolution du fond rechargé 3 – tombant de tempête.

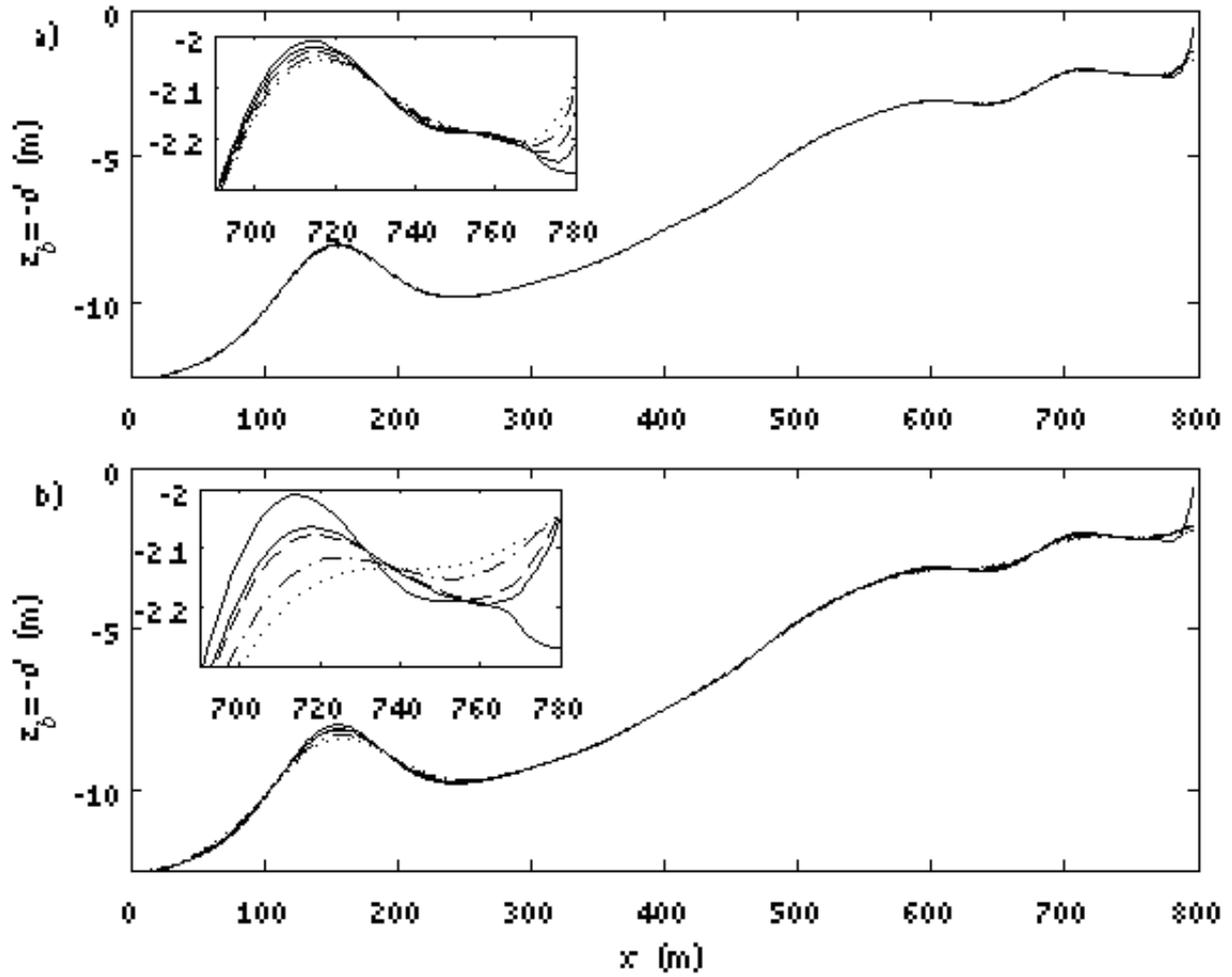


Figure B.30 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé 3 () pour différentes heures : (a) () t=1h, (- -) t=2h, (- -) t=3h, () t=4h, (b) () t=6h, (- -) t=8h, (- -) t=16h, () t=24h.

Leucate – profil 7 : tempête classique.

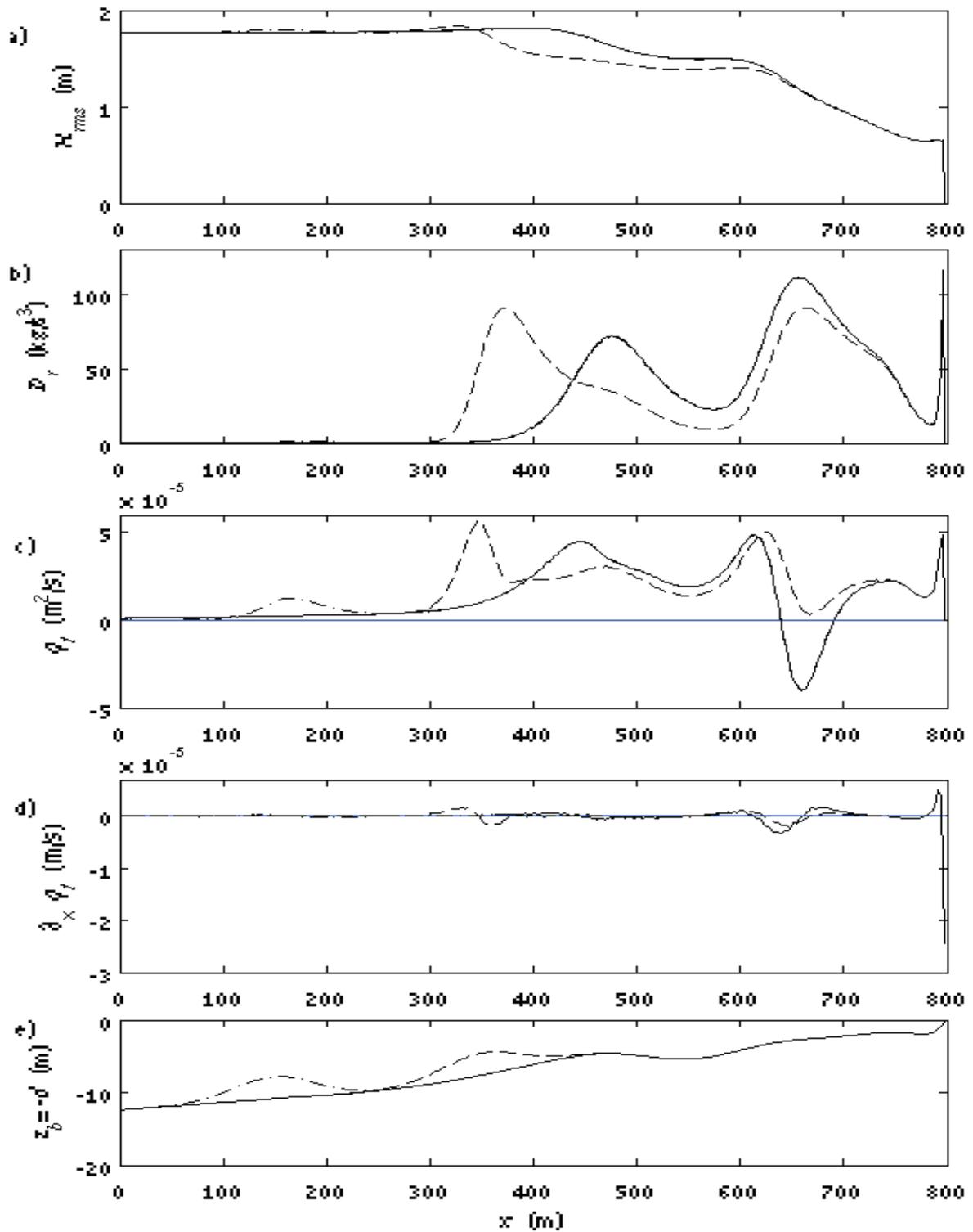


Figure B.31 : Profils de (a) hauteur de houle $H_{rms}(x)$, (b) taux de dissipation du rouleau de déferlement $D_r(x)$, (c) flux total de sédiment q_t , (d) gradient horizontal du flux total de sédiment $\partial_x q_t$, (e) (---) fond initial, (- -) fond rechargé 1, (-.-) fond rechargé 2.

Leucate – profil 7 : tempête exceptionnelle.

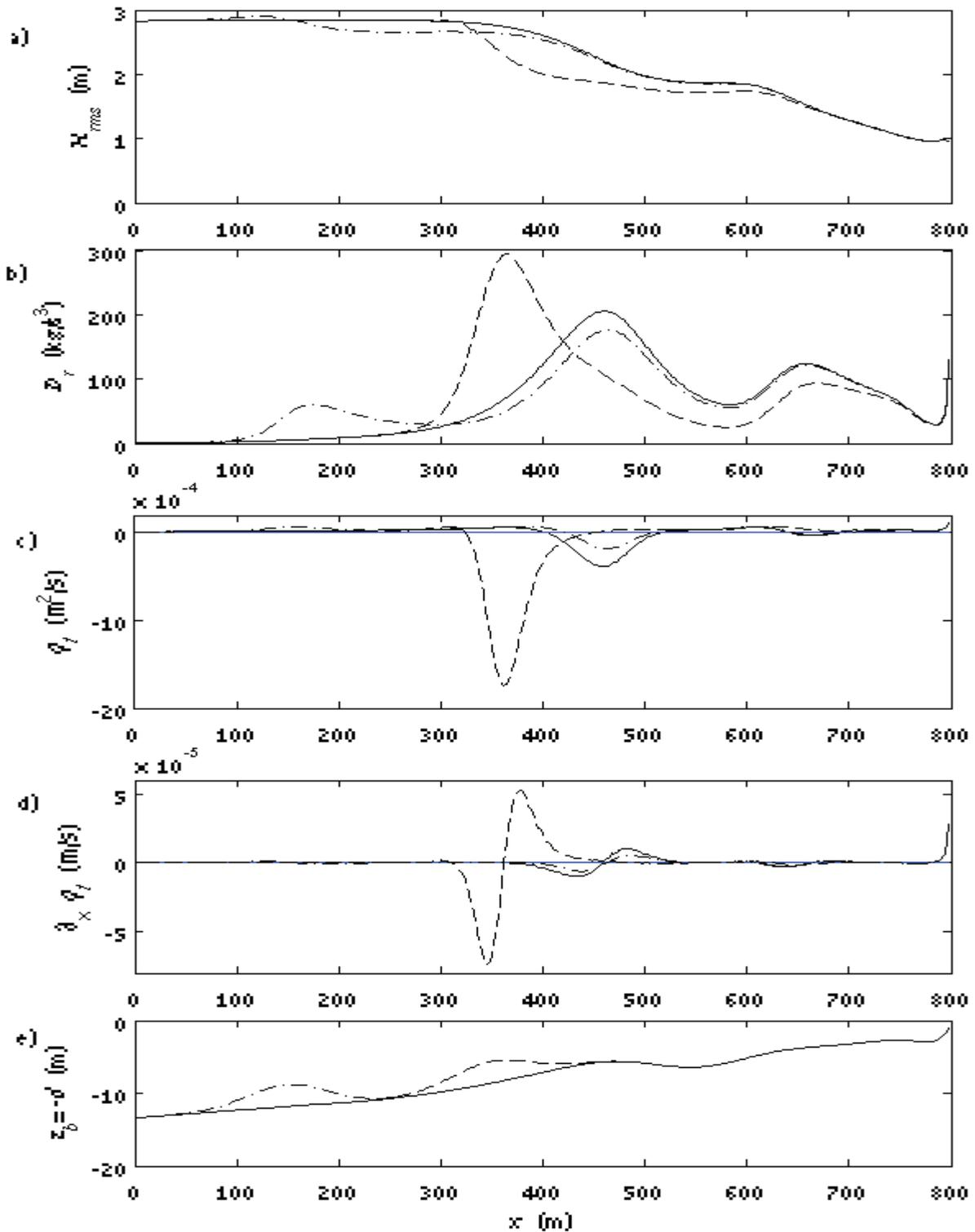


Figure B.32 : Profils de (a) hauteur de houle $H_{rms}(x)$, (b) taux de dissipation du rouleau de déferlement $D_r(x)$, (c) flux total de sédiment q_t , (d) gradient horizontal du flux total de sédiment $\partial_x q_t$, (e) (---) fond initial, (-) fond rechargé 1, (-.-) fond rechargé 2.

Leucate – profil 7 : tombant de tempête.

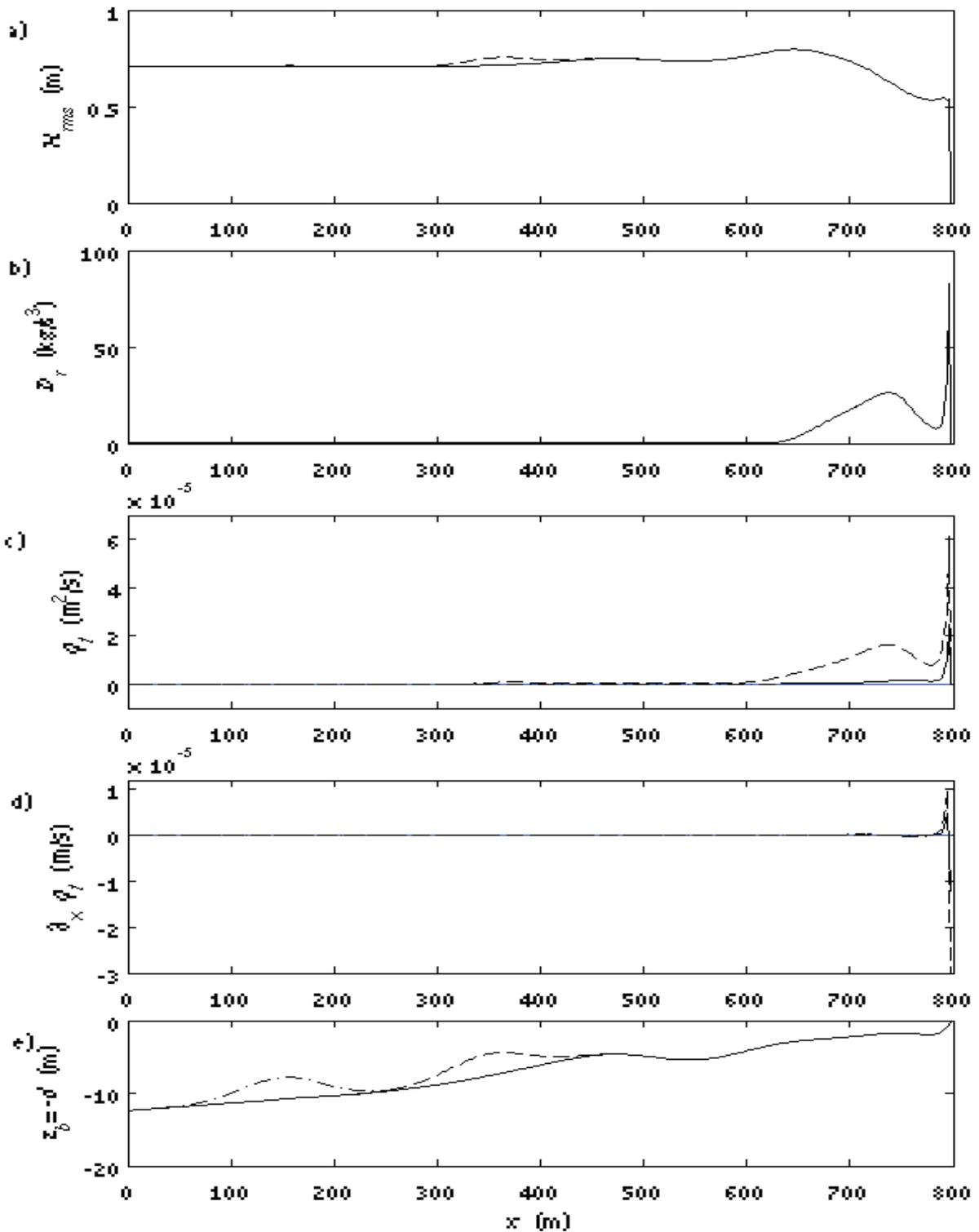


Figure B.33 : Profils de (a) hauteur de houle $H_{rms}(x)$, (b) taux de dissipation du rouleau de déferlement $D_r(x)$, (c) flux total de sédiment q_t , (d) gradient horizontal du flux total de sédiment $\partial_x q_t$, (e) (---) fond initial, (- -) fond rechargé 1, (-.-) fond rechargé 2.

Leucate – profil 7 : évolution du fond initial – tempête classique.

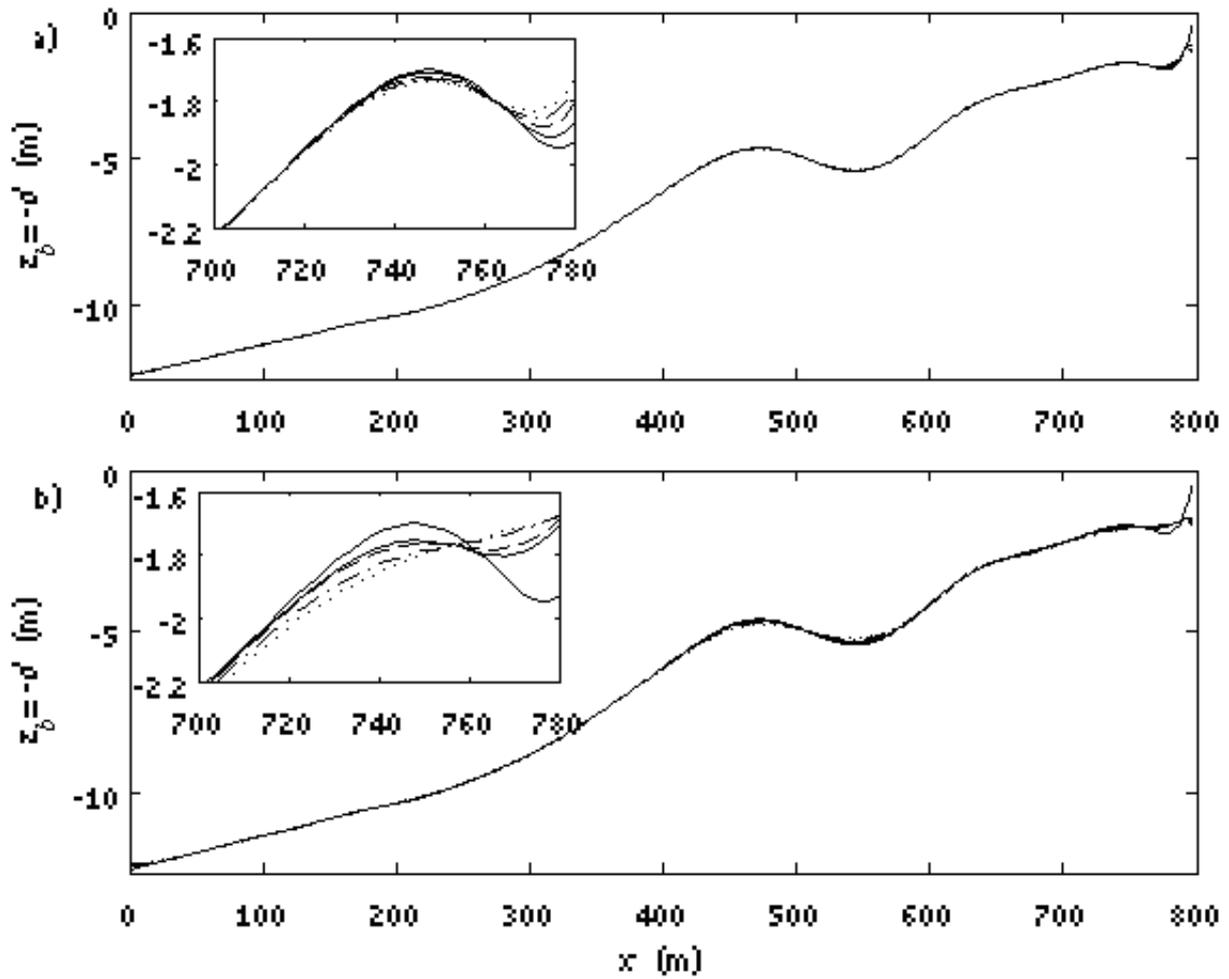


Figure B.34 : Evolution du profil de bathymétrie initial (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-·-) $t=3h$, (···) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-·-) $t=16h$, (···) $t=24h$.

Leucate – profil 7 : évolution du fond initial – tempête exceptionnelle.

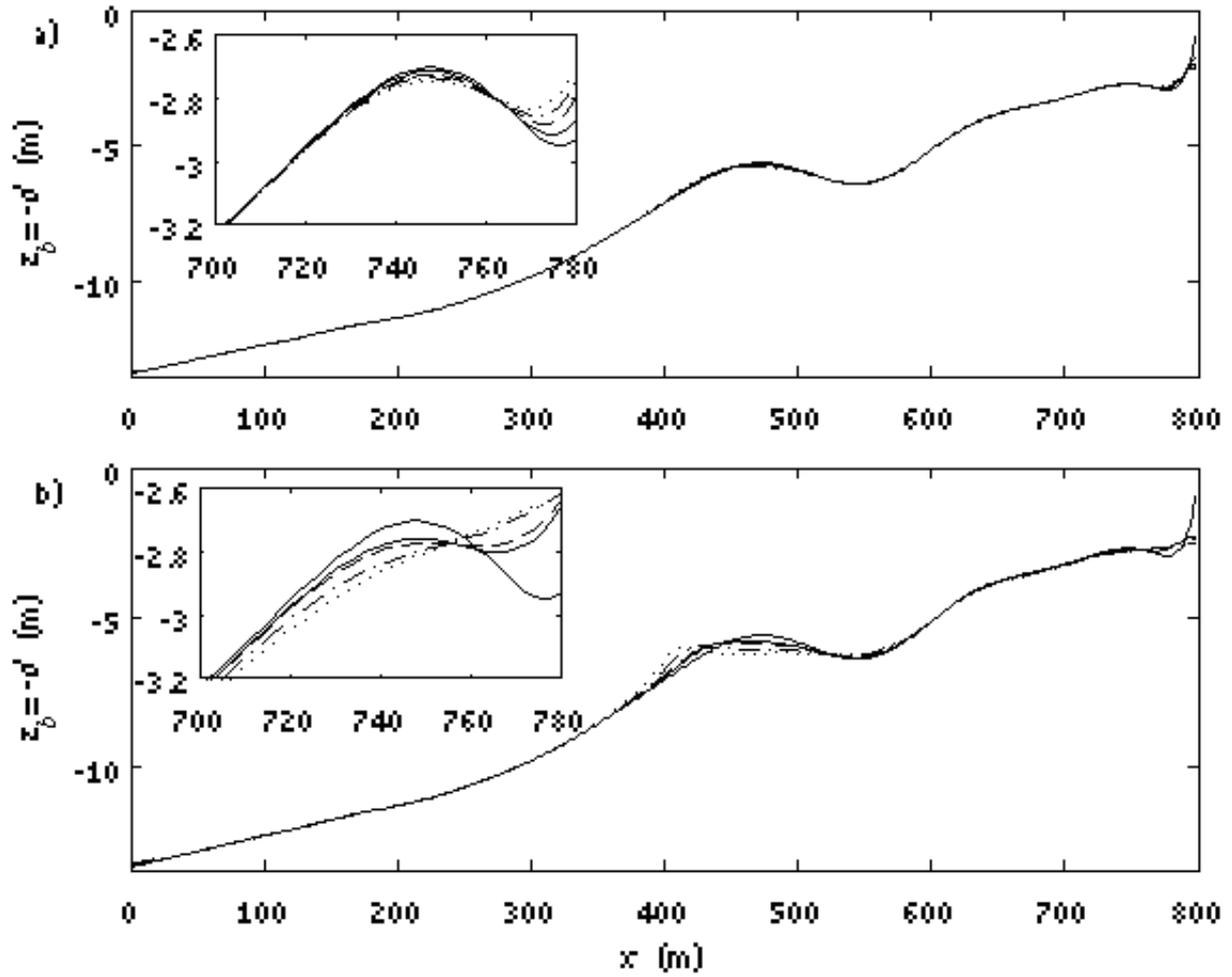


Figure B.35 : Evolution du profil de bathymétrie initial (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-·-) $t=3h$, (···) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-·-) $t=16h$, (···) $t=24h$.

Leucate – profil 7 : évolution du fond initial – tombant de tempête.

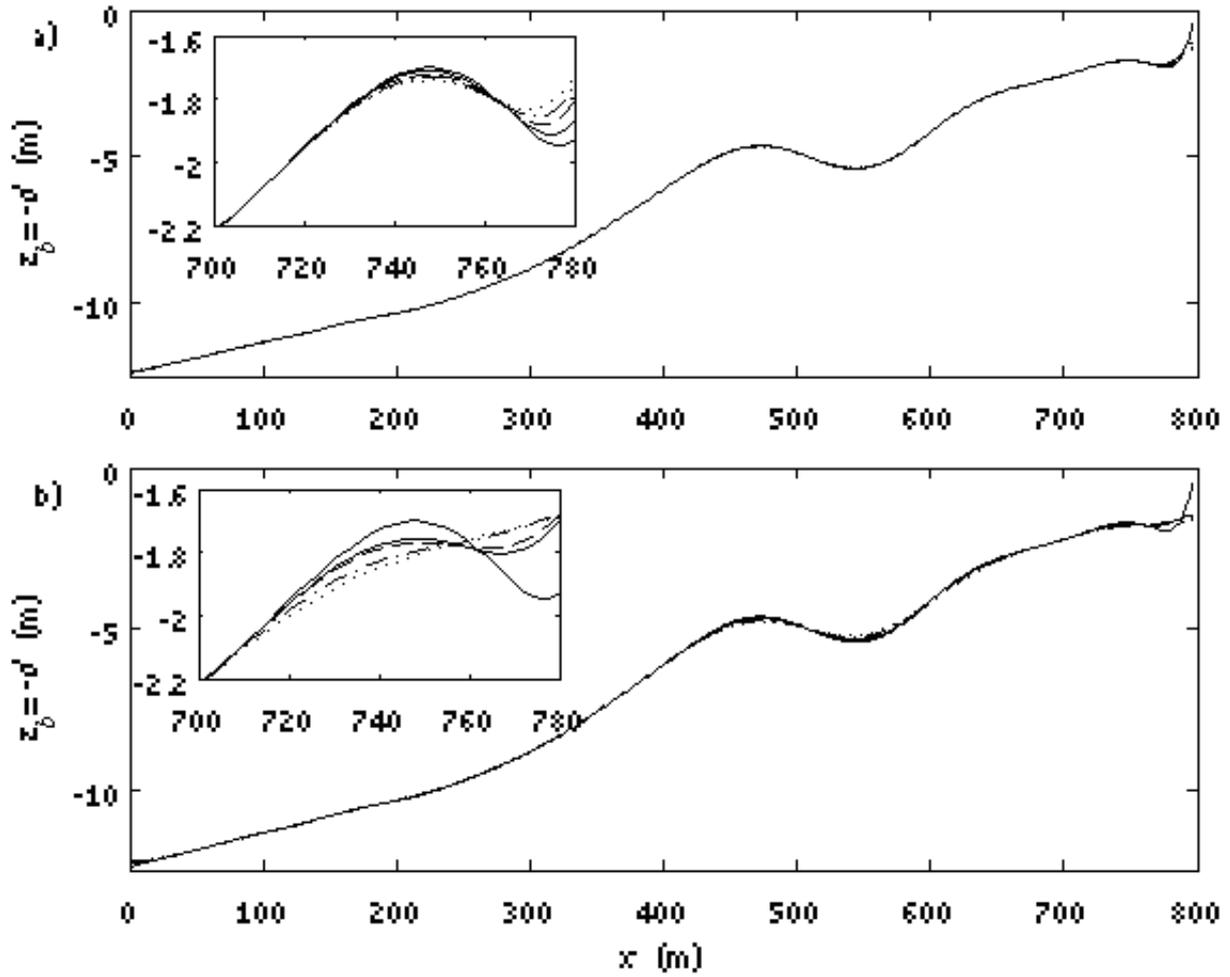


Figure B.36 : Evolution du profil de bathymétrie initial (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1$ h, (- -) $t=2$ h, (-.-) $t=3$ h, (...) $t=4$ h, (b) (—) $t=6$ h, (- -) $t=8$ h, (-.-) $t=16$ h, (...) $t=24$ h.

Leucate – profil 7 : évolution du fond rechargé 1 – tempête classique.

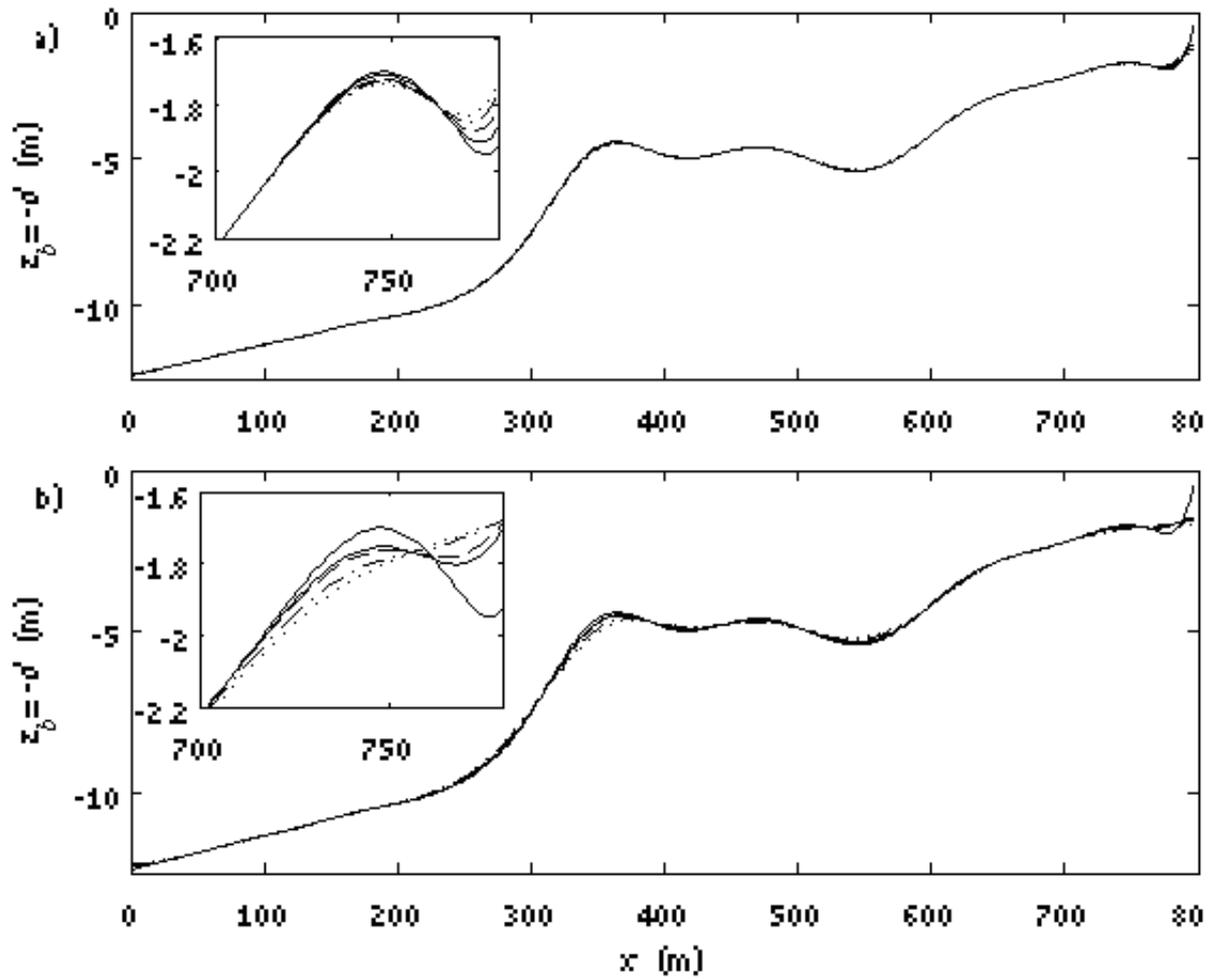


Figure B.37 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé 1 (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-·-) $t=3h$, (··) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-·-) $t=16h$, (··) $t=24h$.

Leucate – profil 7 : évolution du fond rechargé 1 – tempête exceptionnelle.

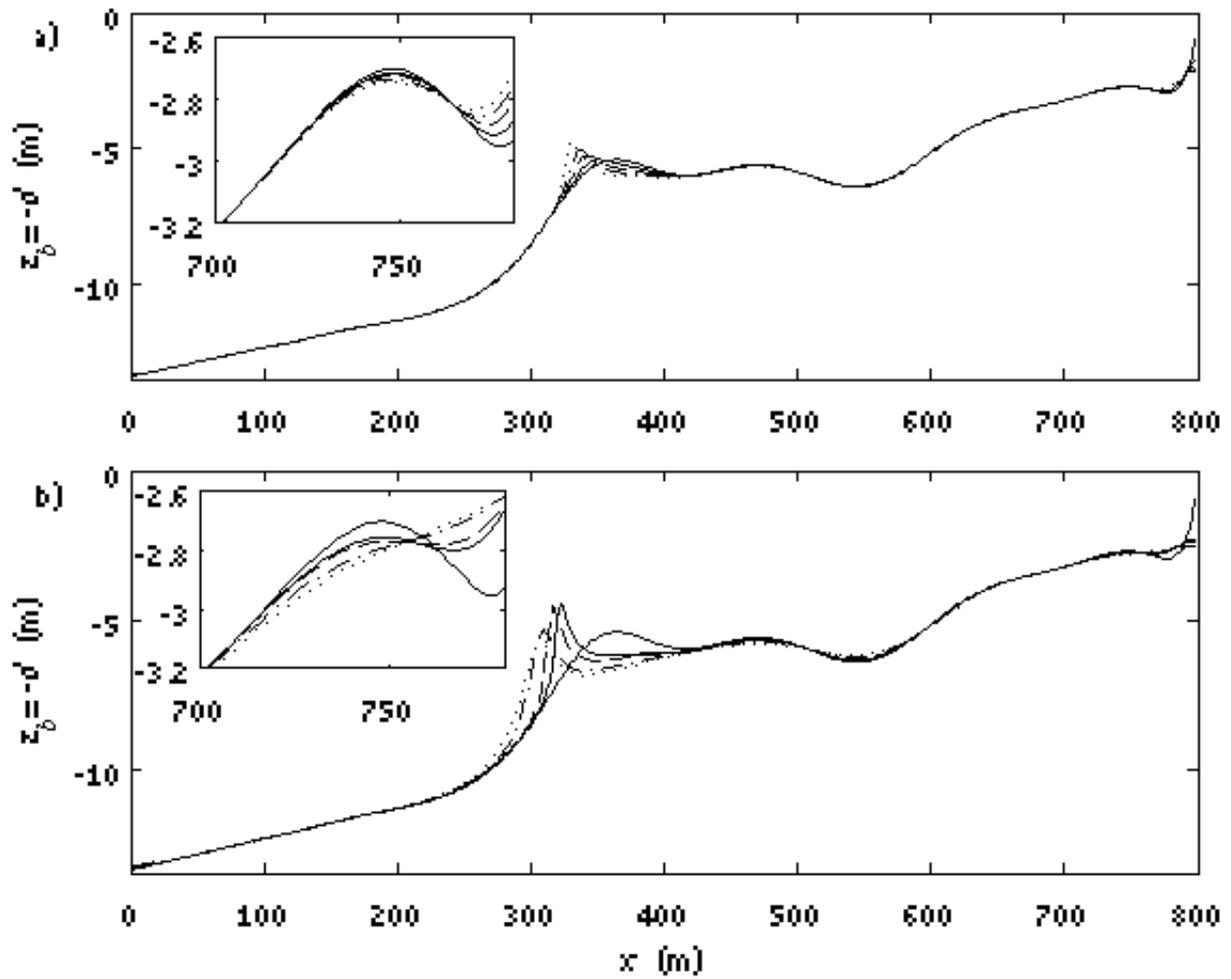


Figure B.38 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé 1 (—) pour différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-·-) t=3h, (···) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-·-) t=16h, (···) t=24h.

Leucate – profil 7 : évolution du fond rechargé 1 – tombant de tempête.

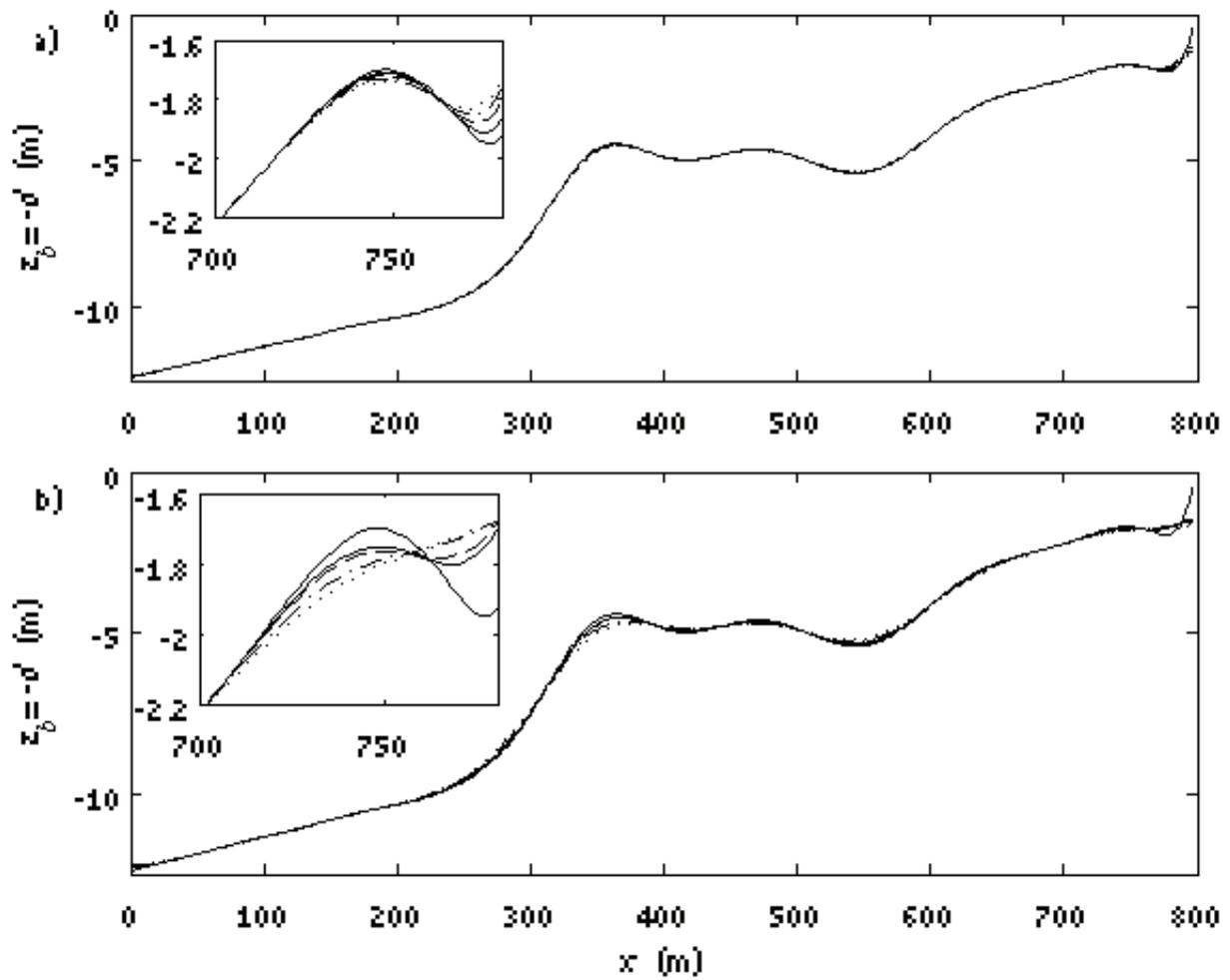


Figure B.39 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé 1 (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-·-) $t=3h$, (···) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-·-) $t=16h$, (···) $t=24h$.

Leucate – profil 7 : évolution du fond rechargé 3 – tempête classique.

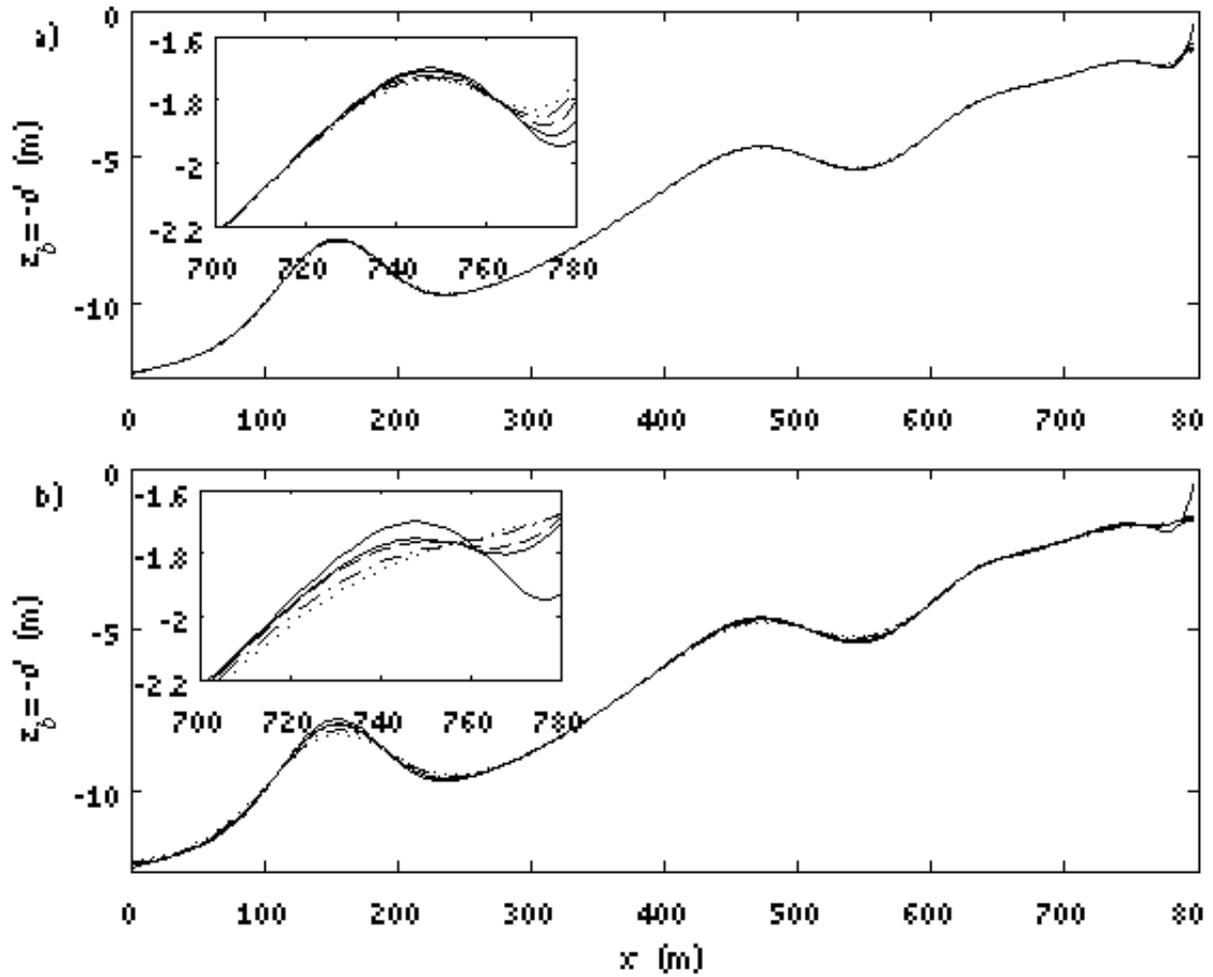


Figure B.40 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé 2 (—) pour différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-·-) t=3h, (···) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-·-) t=16h, (···) t=24h.

Leucate – profil 7 : évolution du fond rechargé 3 – tempête exceptionnelle.

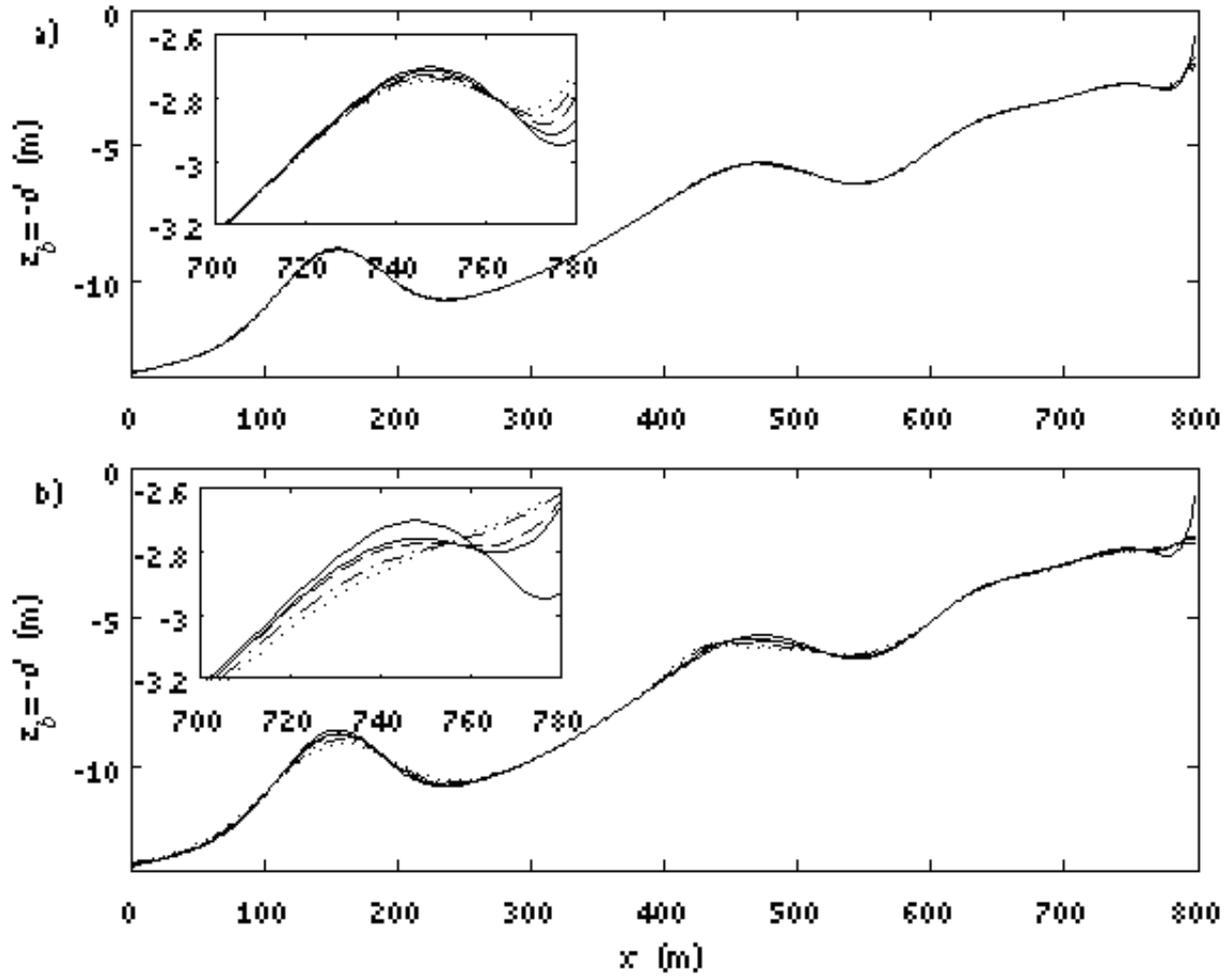


Figure B.41 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé 2 (—) pour différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-·-) t=3h, (···) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-·-) t=16h, (···) t=24h.

Leucate – profil 7 : évolution du fond à 3 barres – tombant de tempête.

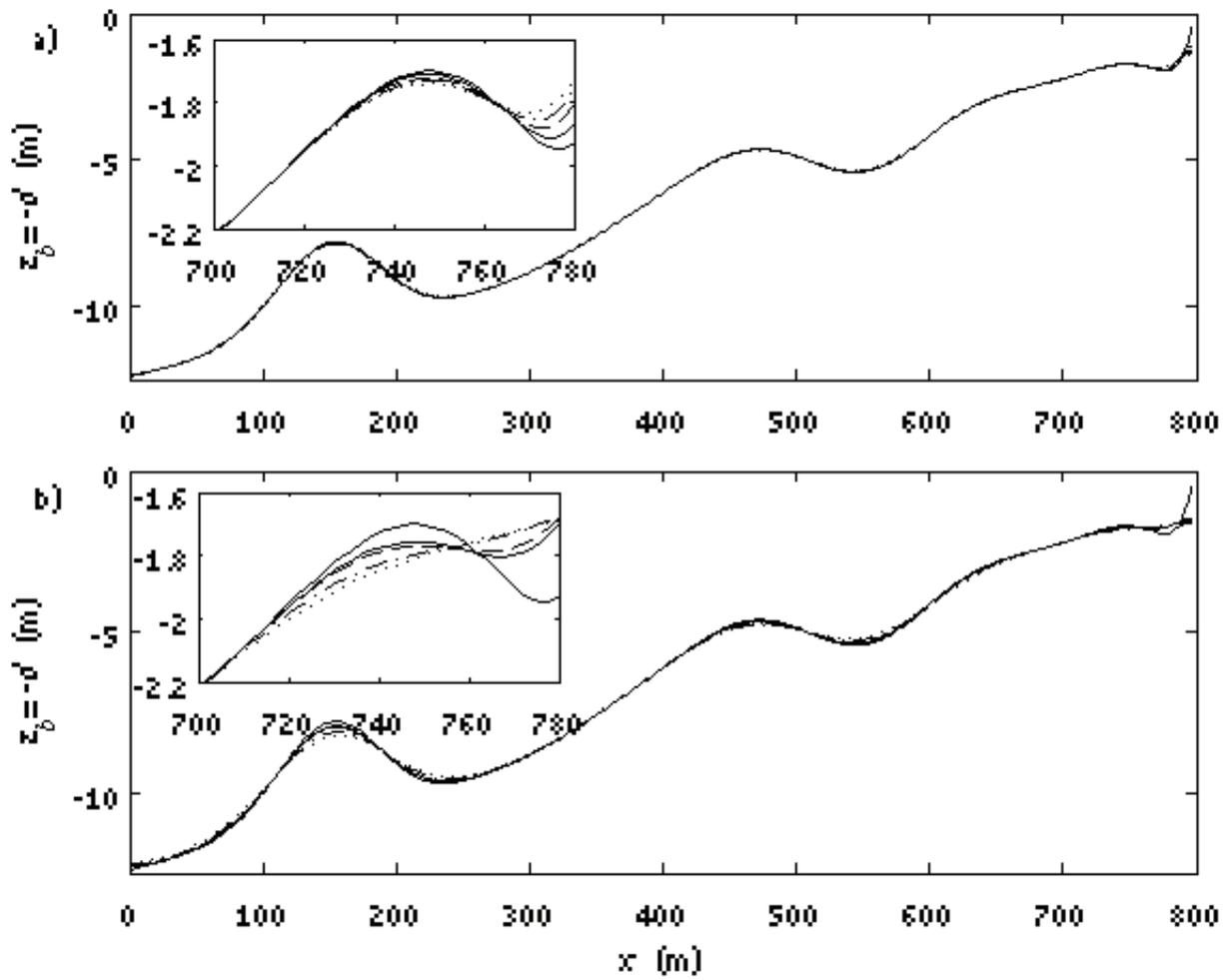


Figure B.42 : Evolution du profil de bathymétrie recharge 2 (—) pour différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-·-) t=3h, (···) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-·-) t=16h, (···) t=24h.

Leucate – profil 9 : tempête classique.

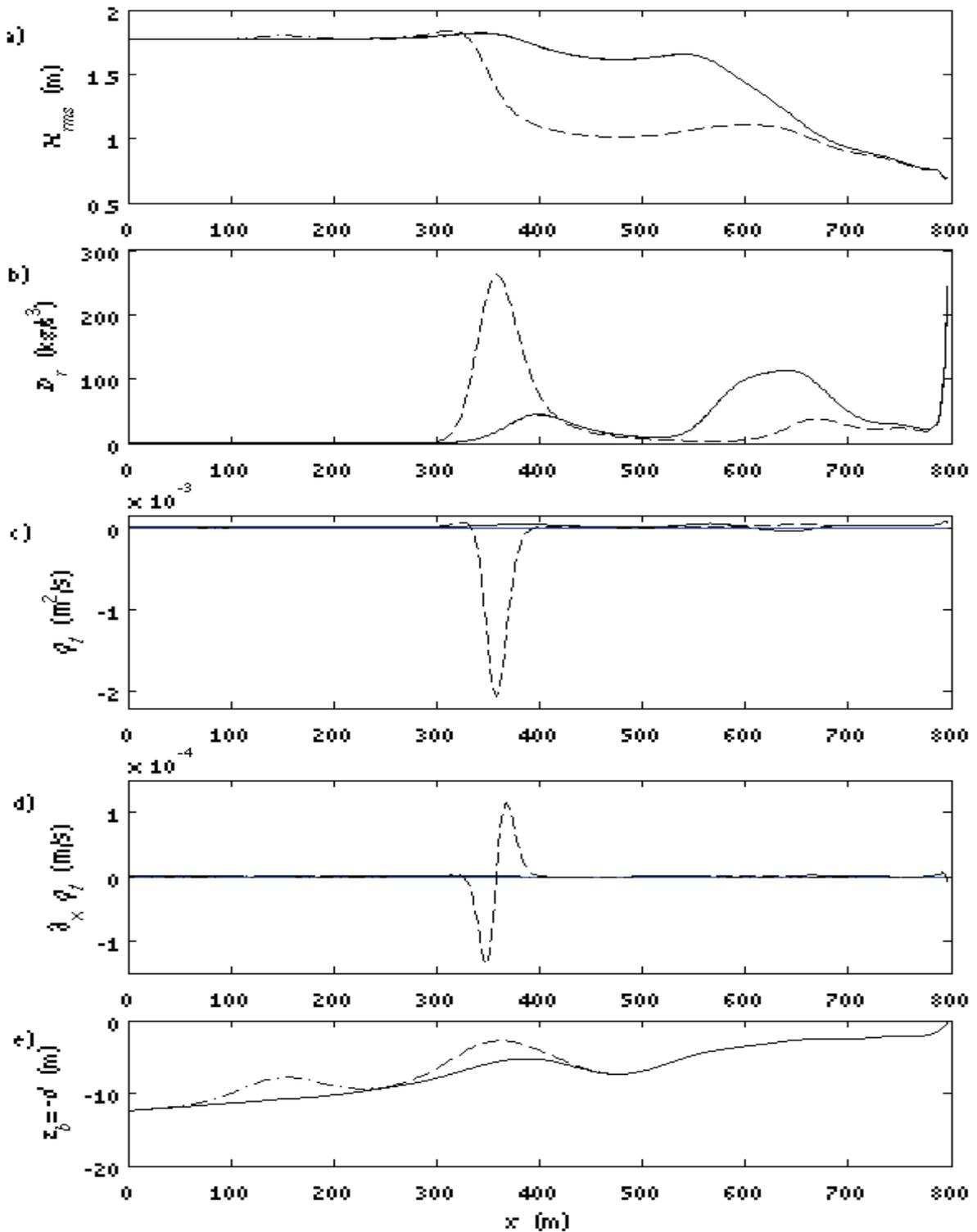


Figure B.43 : Profils de (a) hauteur de houle $H_{rms}(x)$, (b) taux de dissipation du rouleau de déferlement $D_r(x)$, (c) flux total de sédiment q_t , (d) gradient horizontal du flux total de sédiment $\partial_x q_t$, (e) (---) fond initial, (- -) fond rechargé 1, (-.-) fond rechargé 2.

Leucate – profil 9 : tempête exceptionnelle.

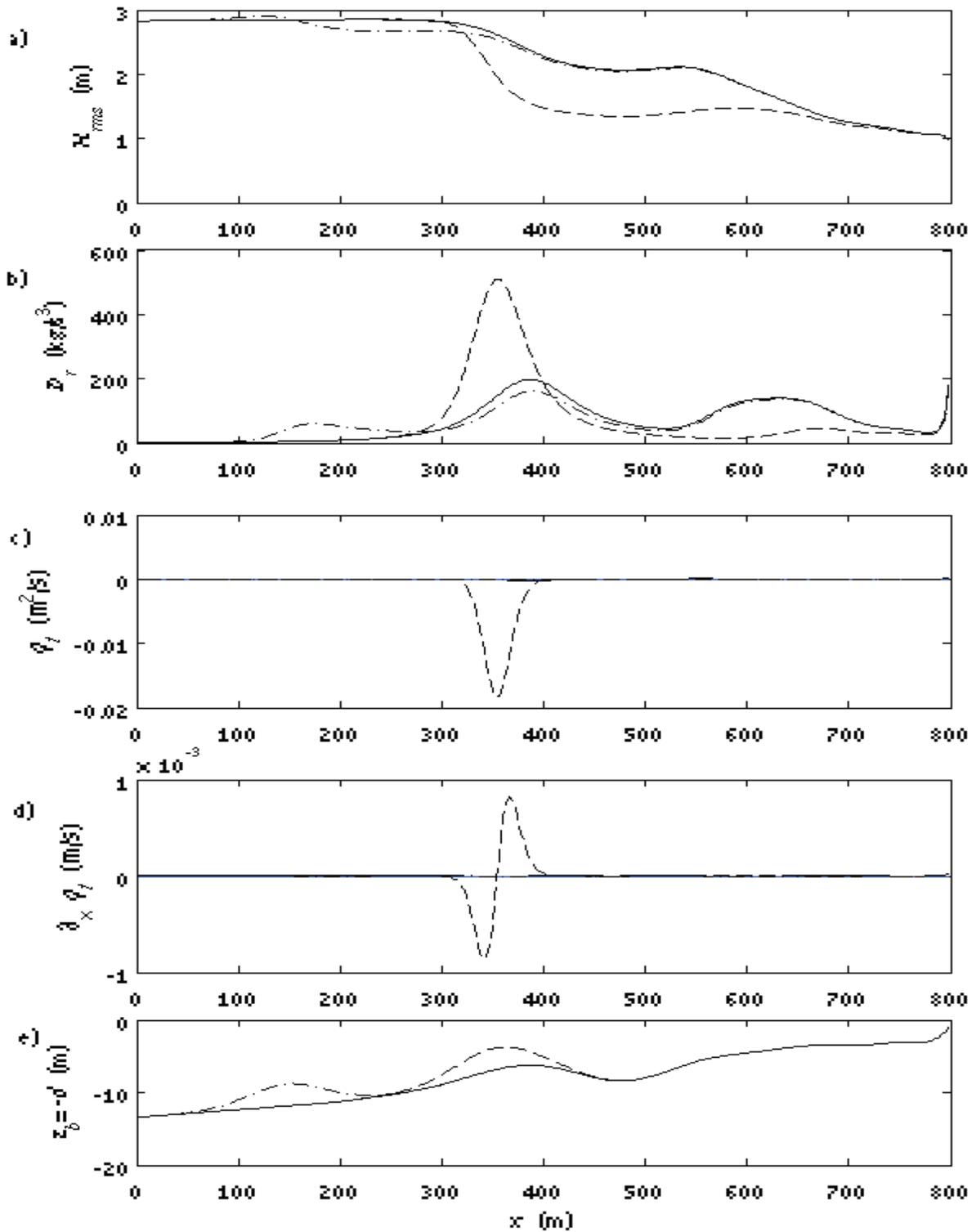


Figure B.44 : Profils de (a) hauteur de houle $H_{rms}(x)$, (b) taux de dissipation du rouleau de déferlement $D_r(x)$, (c) flux total de sédiment q_t , (d) gradient horizontal du flux total de sédiment $\partial_x q_t$, (e) (---) fond initial, (-.-) fond rechargé 1, (-) fond rechargé 2.

Leucate – profil 9 : tombant de tempête.

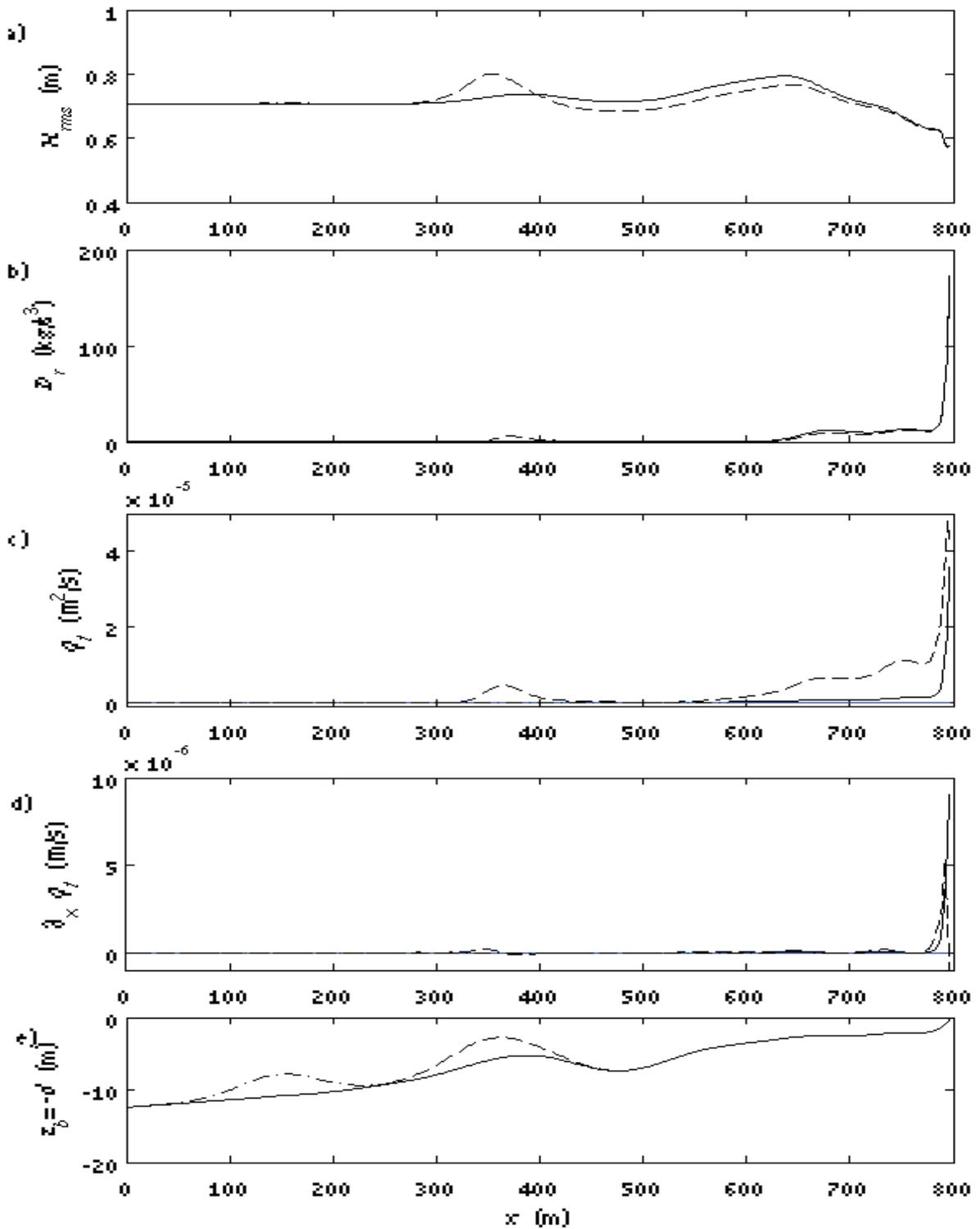


Figure B.45 : Profils de (a) hauteur de houle $H_{rms}(x)$, (b) taux de dissipation du rouleau de déferlement $D_r(x)$, (c) flux total de sédiment q_t , (d) gradient horizontal du flux total de sédiment $\partial_x q_t$, (e) (---) fond initial, (- -) fond rechargé 1, (-.-) fond rechargé 2.

Leucate – profil 9 : évolution du fond initial – tempête classique.

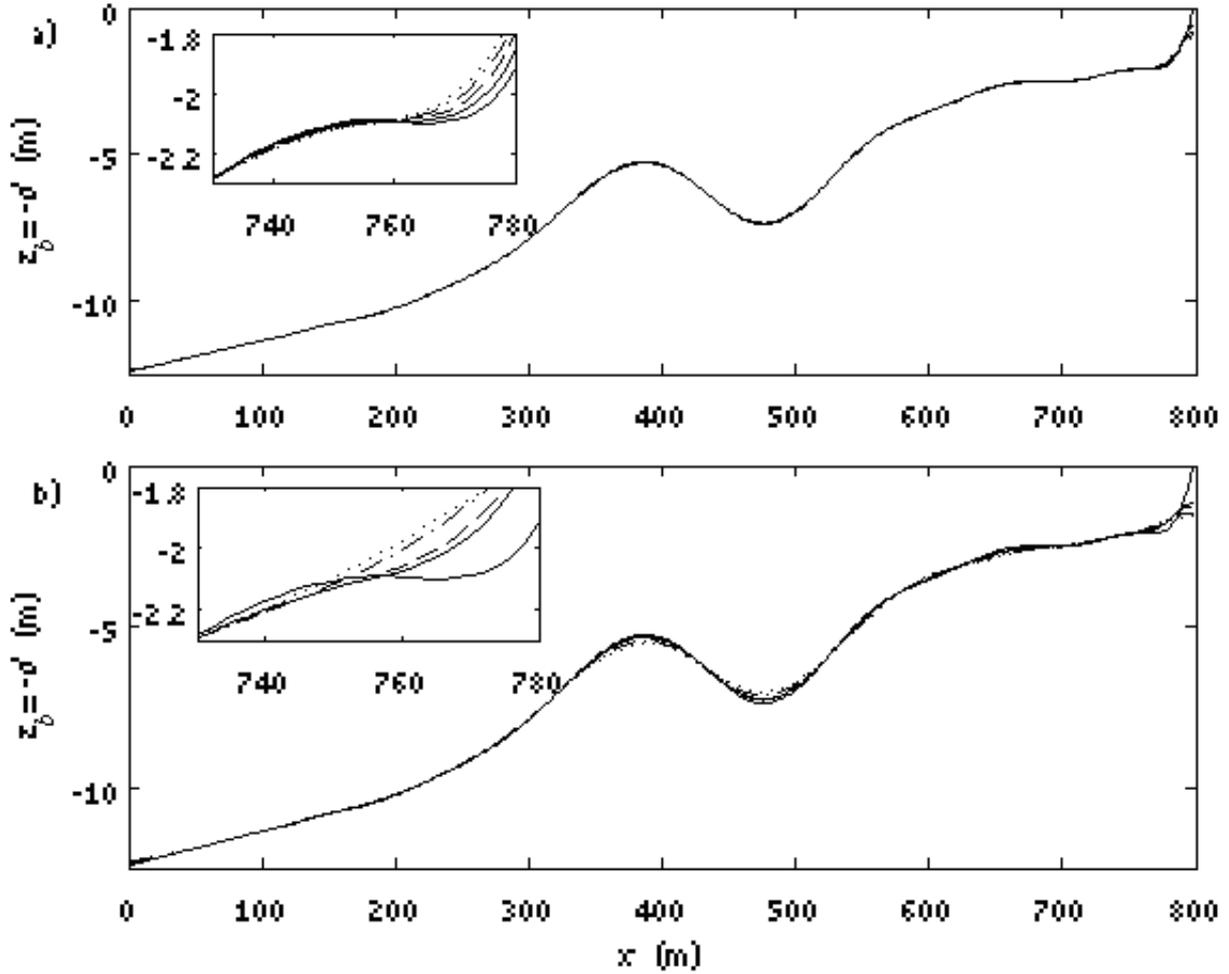


Figure B.46 : Evolution du profil de bathymétrie initial (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-.-) $t=3h$, (...) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-.-) $t=16h$, (...) $t=24h$.

Leucate – profil 9 : évolution du fond initial – tempête exceptionnelle.

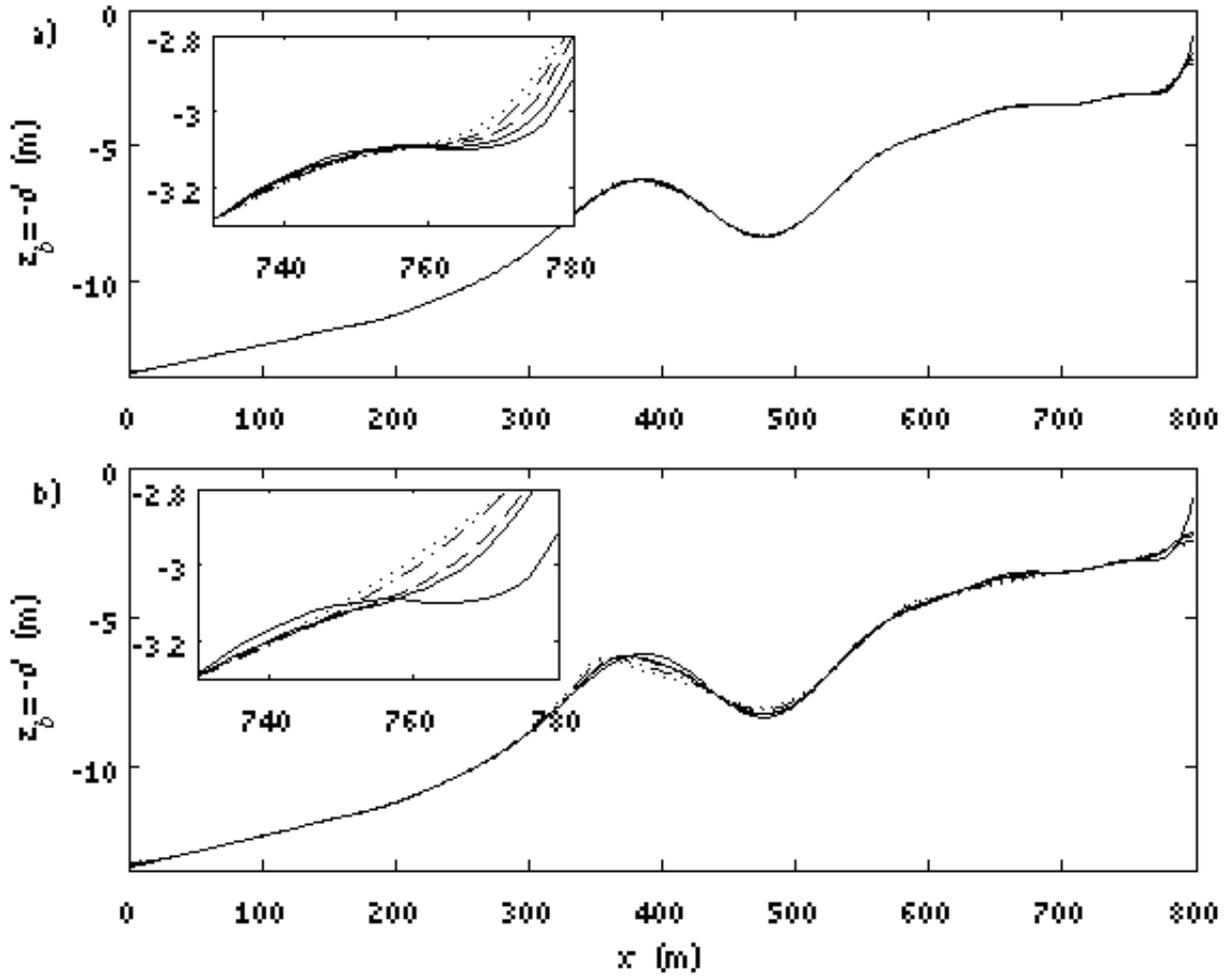


Figure B.47 : Evolution du profil de bathymétrie initial (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-.-) $t=3h$, (...) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-.-) $t=16h$, (...) $t=24h$.

Leucate – profil 9 : évolution du fond rechargé 1 – tempête classique.

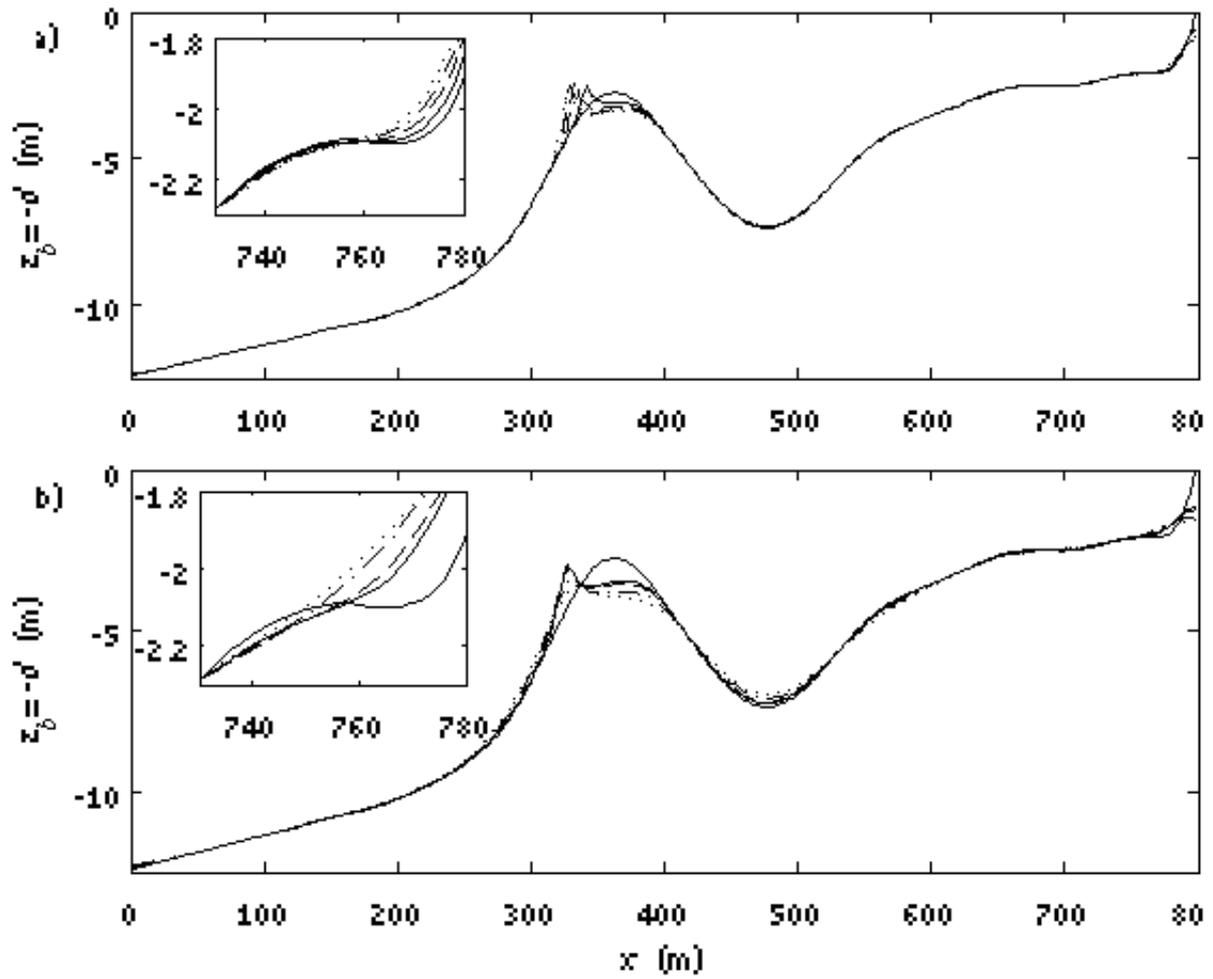


Figure B.48 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé 1 (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-·-) $t=3h$, (···) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-·-) $t=16h$, (···) $t=24h$.

Leucate – profil 9 : évolution du fond rechargé 1 – tombant de tempête.

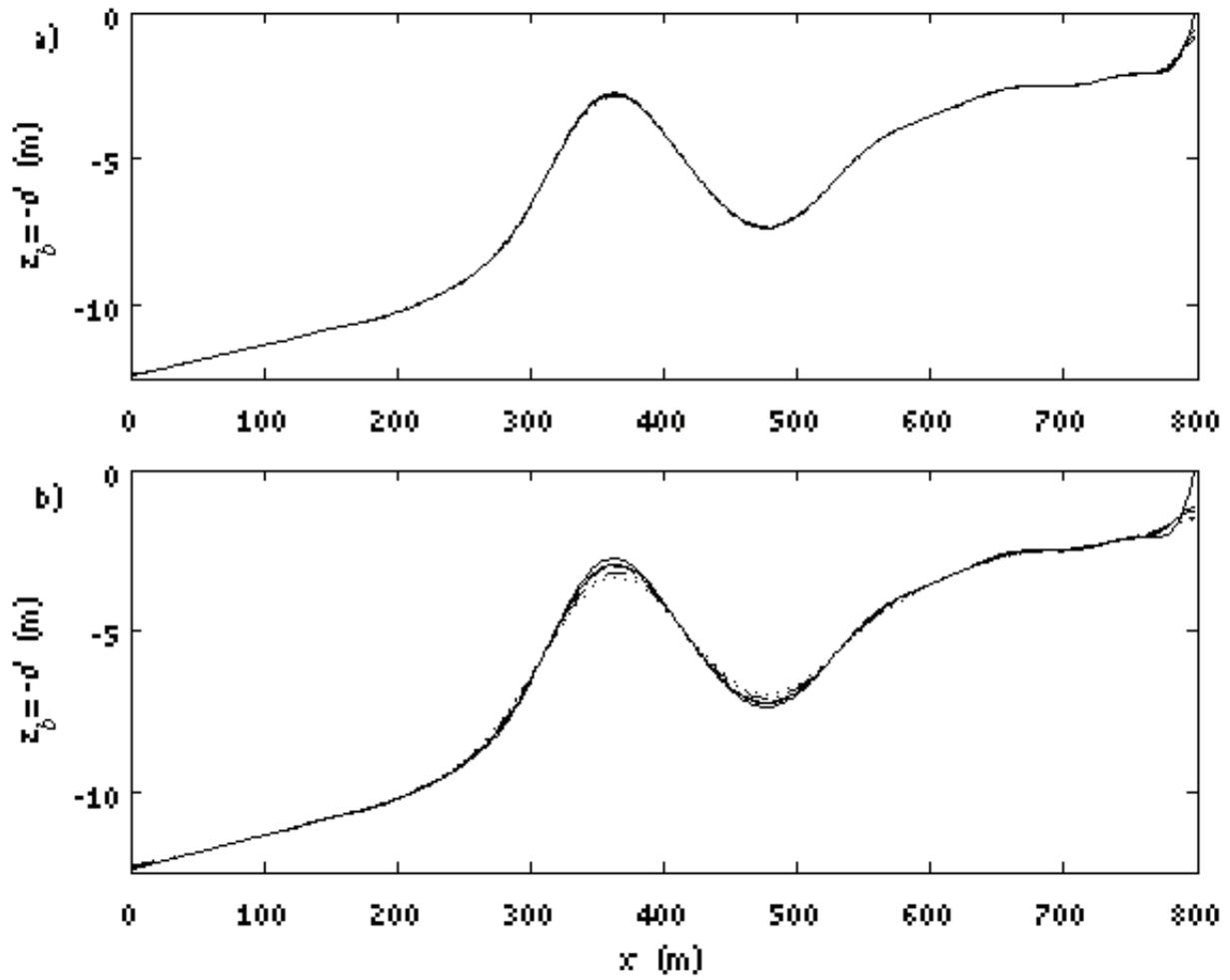


Figure B.49 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé 1 (—) pour différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-·-) t=3h, (···) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-·-) t=16h, (···) t=24h.

Leucate – profil 9 : évolution du fond rechargé 3 – tempête classique.

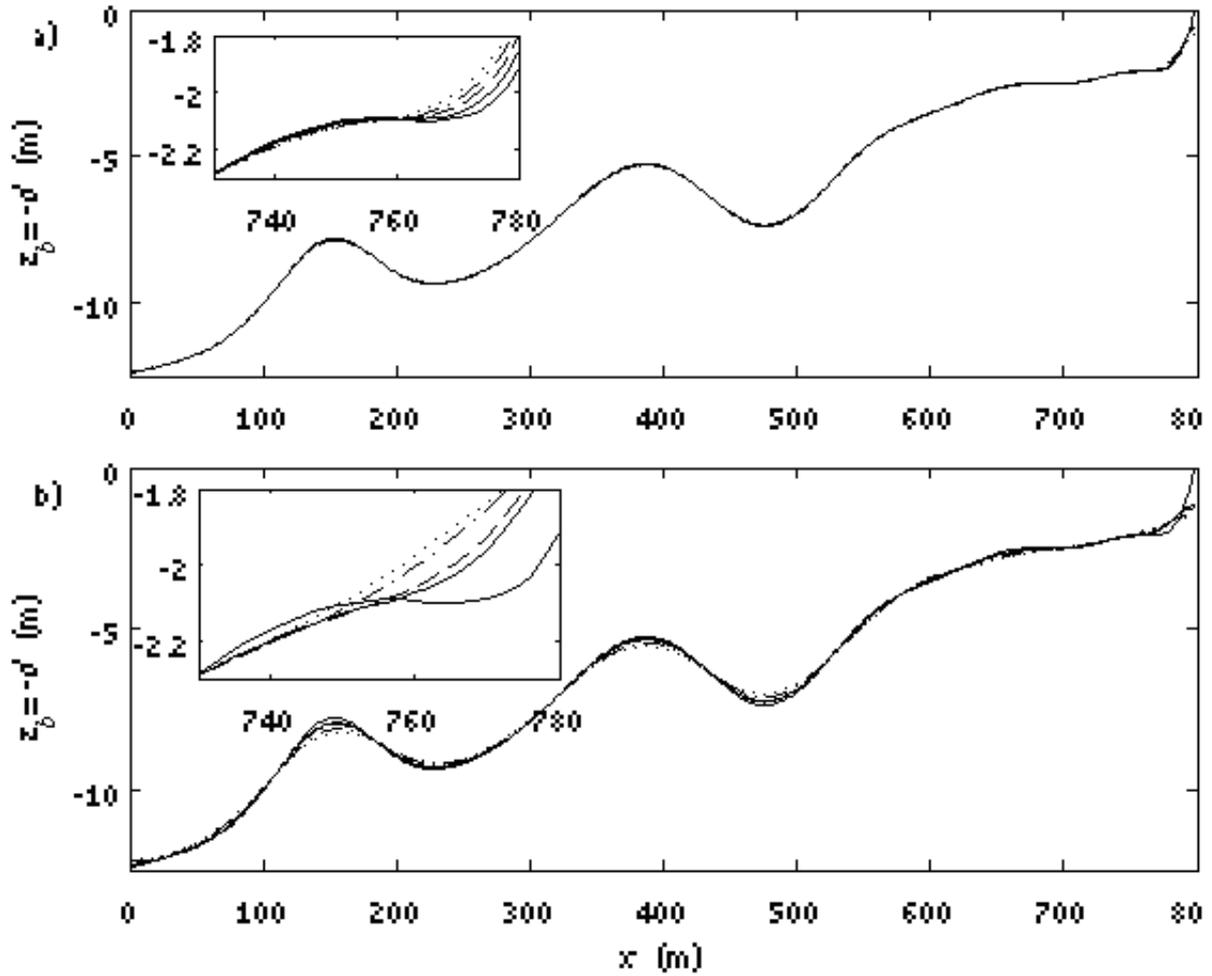


Figure B.50 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé 3 (—) pour différentes heures : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-·-) t=3h, (···) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-·-) t=16h, (···) t=24h.

Leucate – profil 9 : évolution du fond rechargé 3 – tempête exceptionnelle.

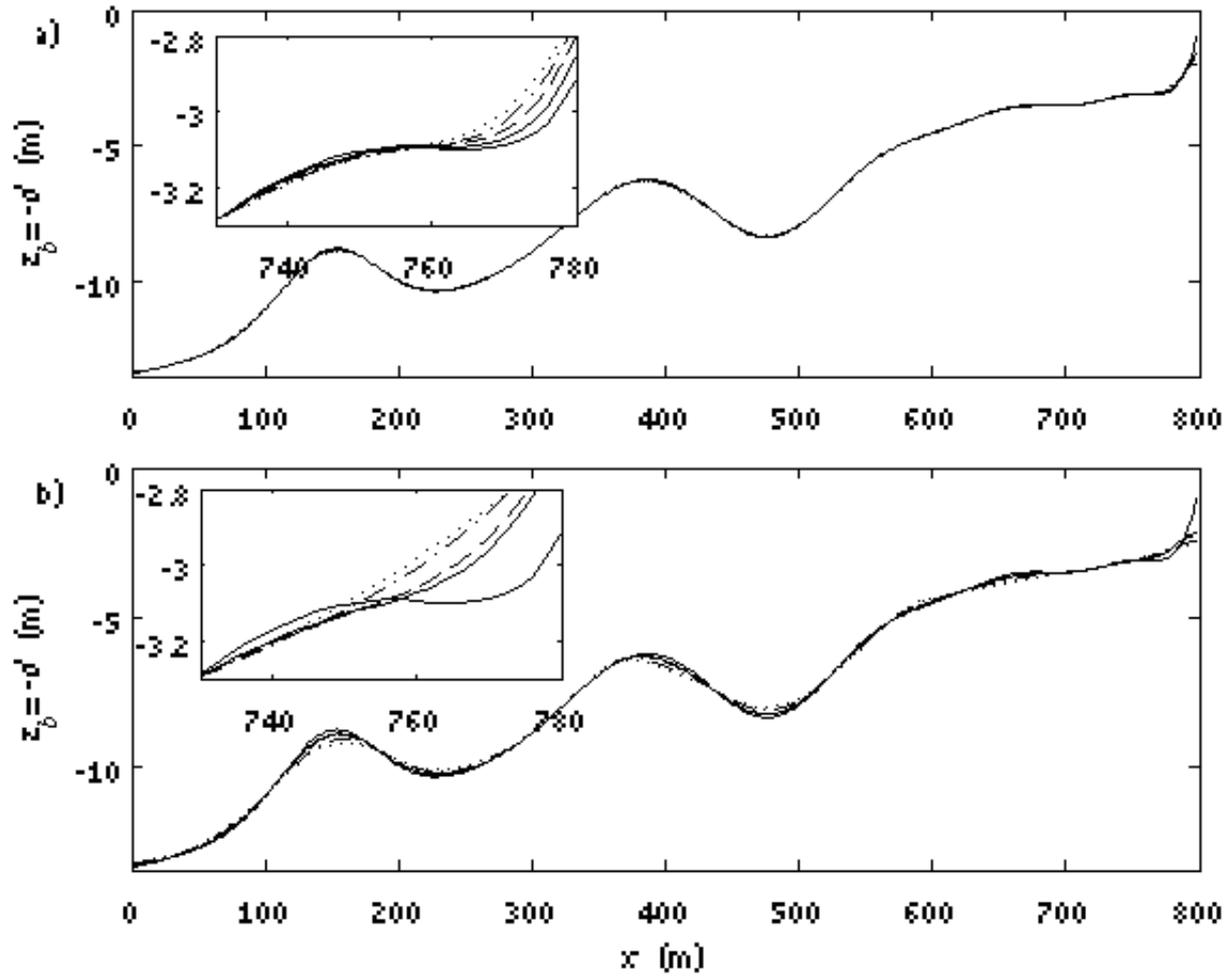


Figure B.51 : Evolution du profil de bathymétrie rechargé 3 (—) pour différentes heures : (a) (—) $t=1h$, (- -) $t=2h$, (-·-) $t=3h$, (···) $t=4h$, (b) (—) $t=6h$, (- -) $t=8h$, (-·-) $t=16h$, (···) $t=24h$.

B.6.2 RESULTATS OBTENUS POUR TELEMAT ET LE MODELE MULTI 1DH

A- Simulations par profils transversaux (modèle multi1DH)

Le modèle utilisé

Le modèle Multi1DH-Sisyphé est un modèle paramétré simple mais pour éviter de programmer l'équation de l'évolution de fond et les méthodes de résolution de système par des méthodes numériques, il a été décidé d'implémenter le modèle 1DH pour les houles et les courants *cross-shore* avec roller et longshore dans le Code Sisyphé. Comme ce code d'évolution sédimentaire est 2DH (comme Artemis et Telemac2d), on applique nos calculs 1DH sur chaque ligne *cross-shore* perpendiculaire au trait de côté d'où l'appellation Multi-1DH.

▪ A-1 Plage de Leucate

Les simulations réalisées

Les simulations ont été réalisées pour chaque profil P3, P7 et P9 sur le profil naturel **sans rechargement** (ex. P3 simulation sans rechargement) puis **2 cas avec rechargement** appelé Sim 1 (ex. P3 simulation1 avec rechargement) et Sim 3 (ex. P3 simulation3 avec rechargement), qui correspondraient de grands rechargements parallèles à la côte (cf. Fig. B.3 et descriptif). Pour le profil P3, un cas supplémentaire appelé Sim2_1 a été réalisé. Il correspond à un rechargement localisé sur la crête de la corne d'un feston externe (Fig. B.3). Pour l'ensemble de ces cas, on simulé trois conditions de houle au large : TE, TC et TT. Cela aboutit à 30 simulations. Chaque simulation représente une durée de tempête de 24 heures et coût environ 10 minutes de temps CPU. La formule de transport utilisée est celle de Bijker.

Résultats

Analyse morphodynamique

Nous remarquons que les conditions de houles TT avec ou sans rechargement n'affectent pas les profils transversaux de l'avant-côte (Fig. 52 à 54) quelque soit le profil P3, P7 ou P9.

Les conditions de houle TC n'affectent, elles, que peu les profils naturels ou avec rechargement (Fig. 55 à 57) à **l'exception du profil P7 pour le cas naturel et les cas rechargés Sim1 et Sim3** où on observe un comportement identique d'érosion du revers de la barre interne et un léger surcreusement de la fosse interne (Fig. 56). On observe aussi un changement de morphologie sur **P3 uniquement pour le cas naturel** (Fig. 55) avec la destruction de la barre externe et sa re-création plus au large, en laissant une fosse à la place de la position de l'ancienne barre.

Pour les conditions de houle TE, les profils P3, P7 et P9 rechargés ou non **sont attaqués dans leur partie interne avec un maintient du stock de sable entre 250 m et 500 m** (Fig. 58 à 60). On observe en effet une érosion du revers de la barre interne et une accrétion du front de la barre externe (essentiellement pour P7 et P9 pour tous les cas de simulation, P3 n'étant concerné que pour sim1). On observe aussi pour P7 et P9 un déplacement vers le large de la barre surnuméraire au 750.

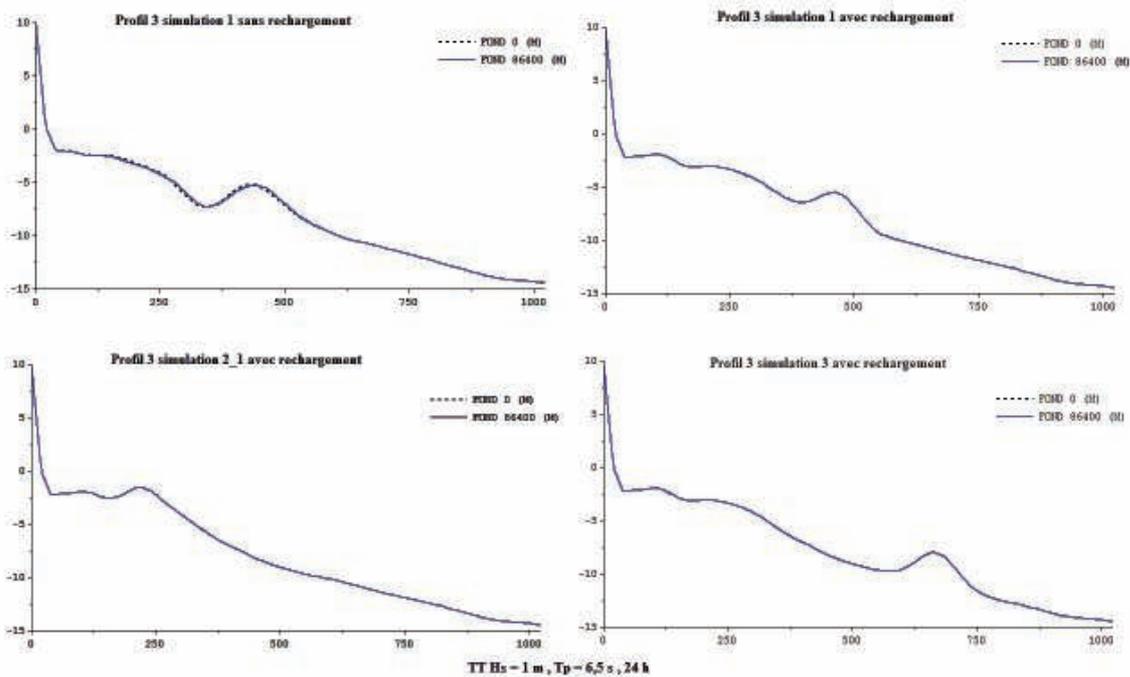


Fig. B.52 : Profil P3 naturel et rechargé avant (trait en pointillé noir) et après simulation (trait bleu continu) pour une situation de tombant de tempête (TT)

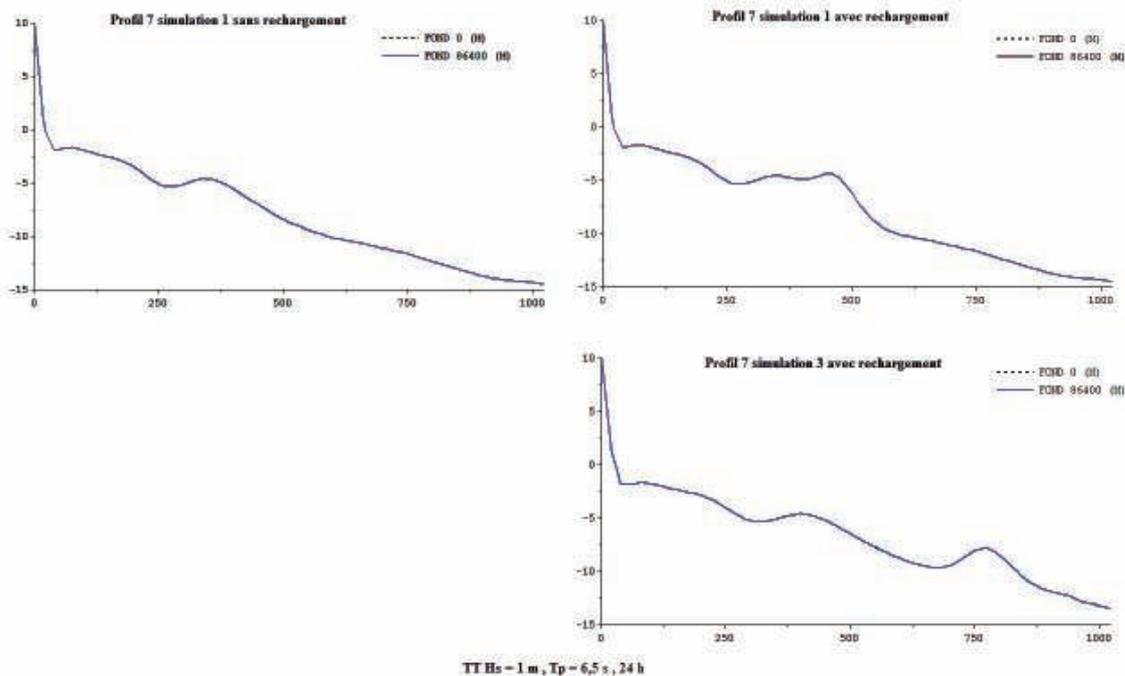


Fig. B.53 : Profil P7 naturel et rechargé avant (trait en pointillé noir) et après simulation (trait bleu continu) pour une situation de tombant de tempête (TT)

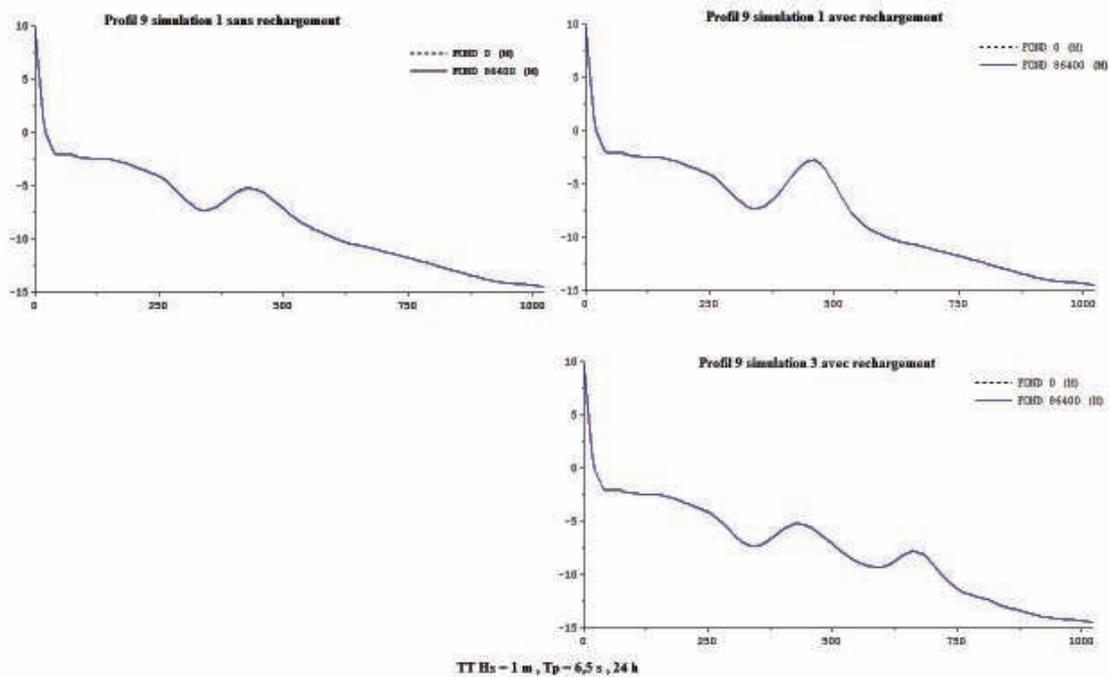


Fig. B.54 : Profil P9 naturel et rechargé avant (trait en pointillé noir) et après simulation (trait bleu continu) pour une situation de tombant de tempête (TT)

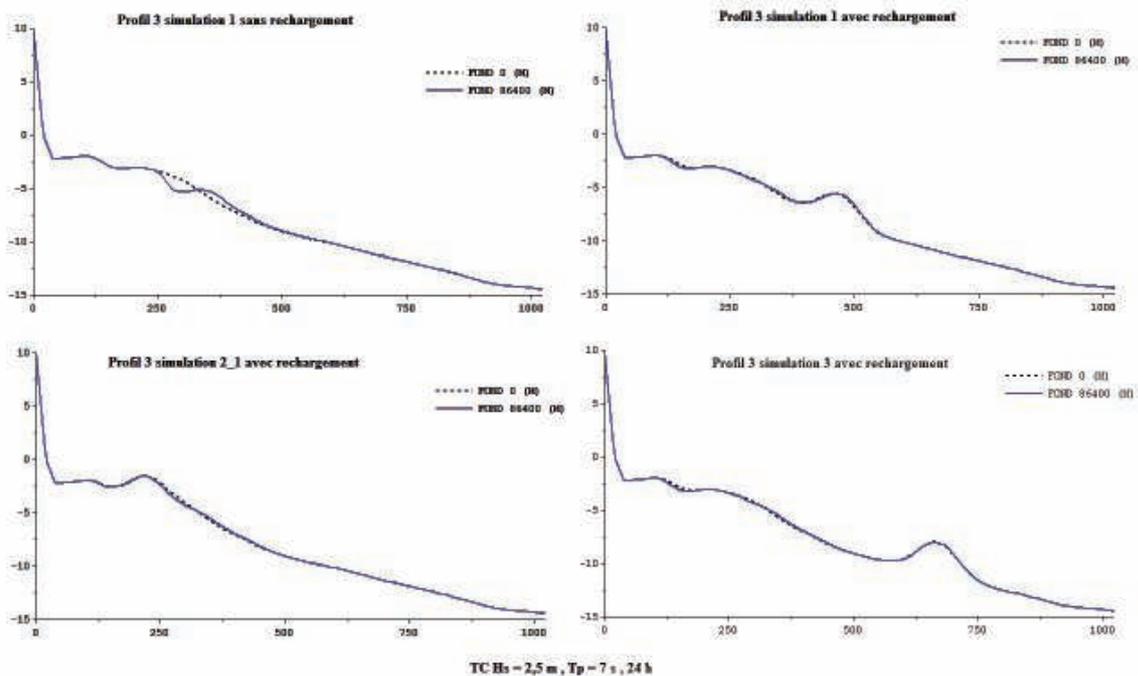


Fig. B.55 : Profil P3 naturel et rechargé avant (trait en pointillé noir) et après simulation (trait bleu continu) pour une situation de tempête classique (TC)

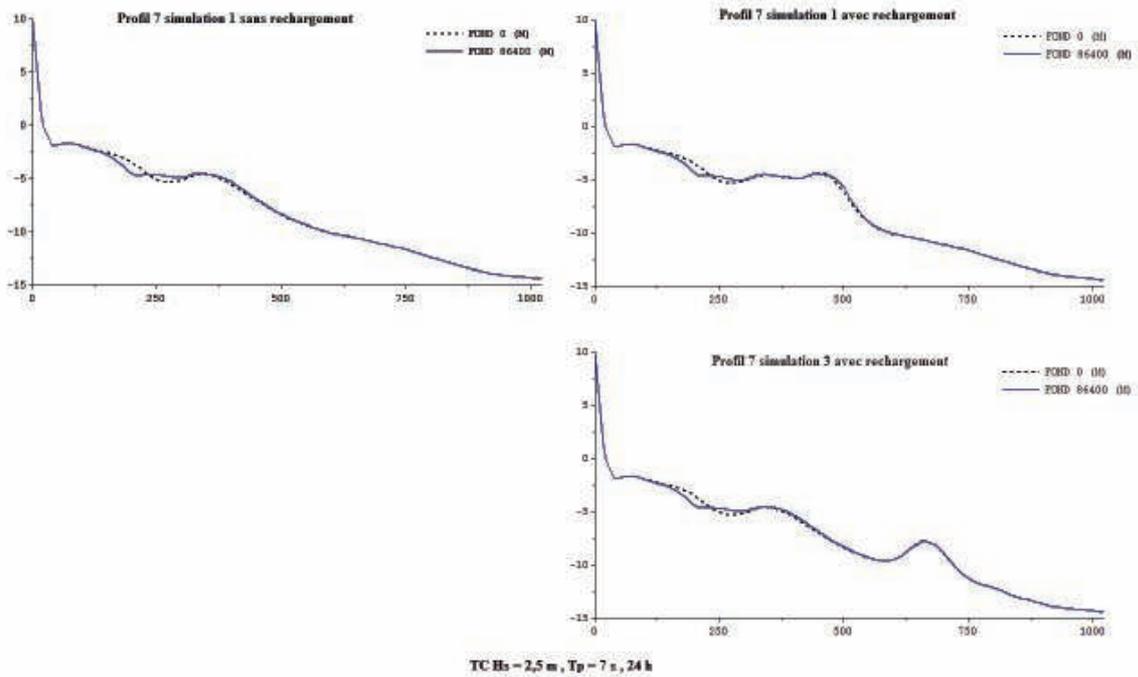


Fig. B.56 : Profil P7 naturel et rechargé avant (trait en pointillé noir) et après simulation (trait bleu continu) pour une situation de tempête classique (TC)

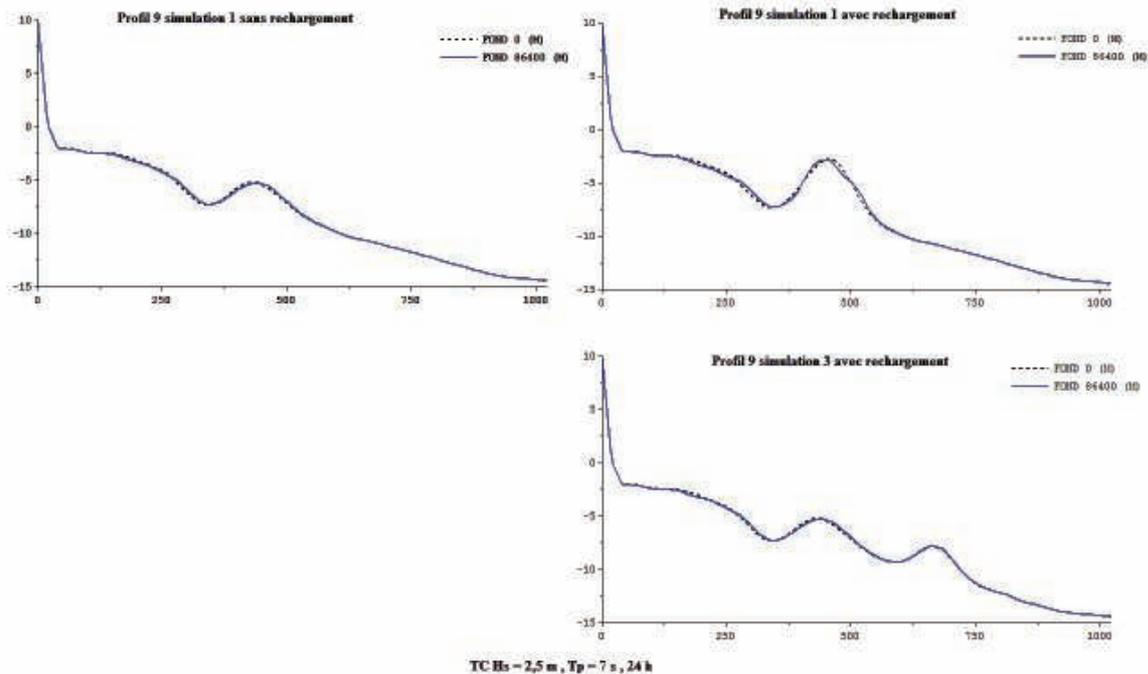


Fig. B.57 : Profil P9 naturel et rechargé avant (trait en pointillé noir) et après simulation (trait bleu continu) pour une situation de tempête classique (TC)

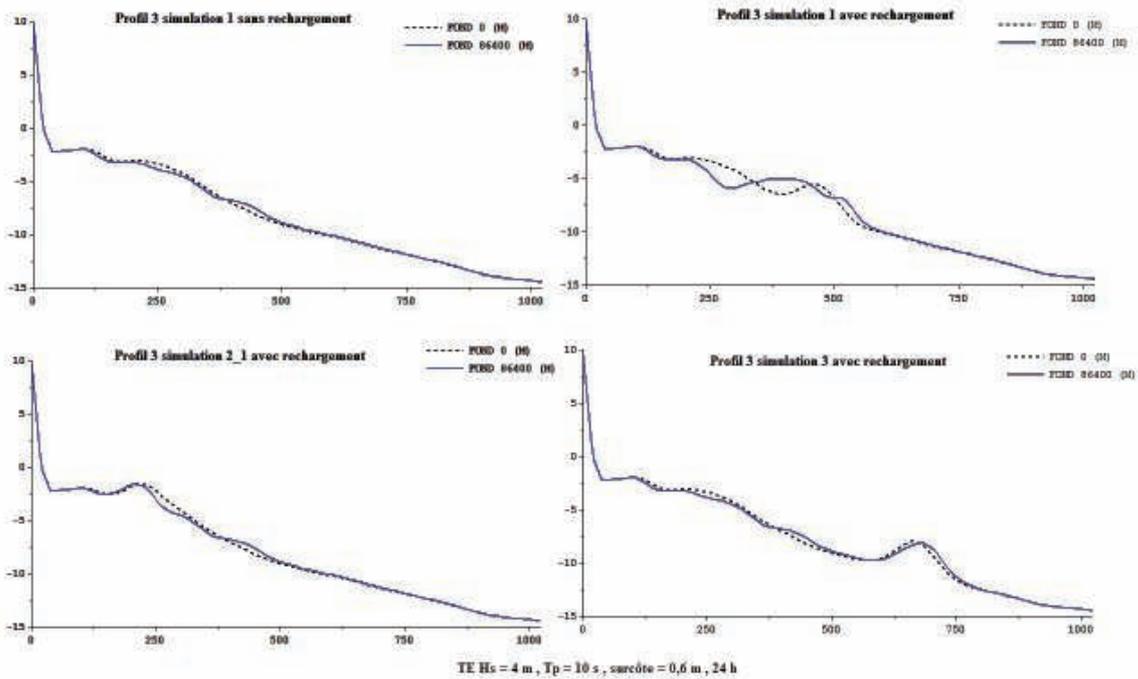


Fig. B.58 : Profil P3 naturel et rechargé avant (trait en pointillé noir) et après simulation (trait bleu continu) pour une situation de tempête exceptionnelle (TE)

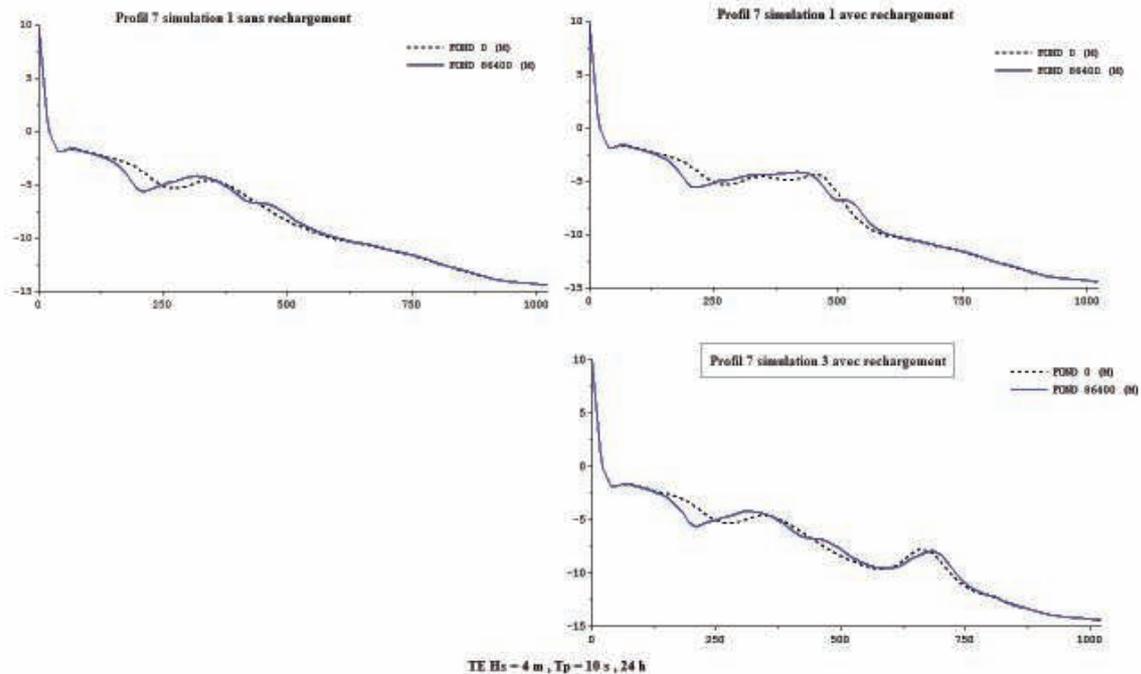


Fig. B.59 : Profil P7 naturel et rechargé avant (trait en pointillé noir) et après simulation (trait bleu continu) pour une situation de tempête exceptionnelle (TE)

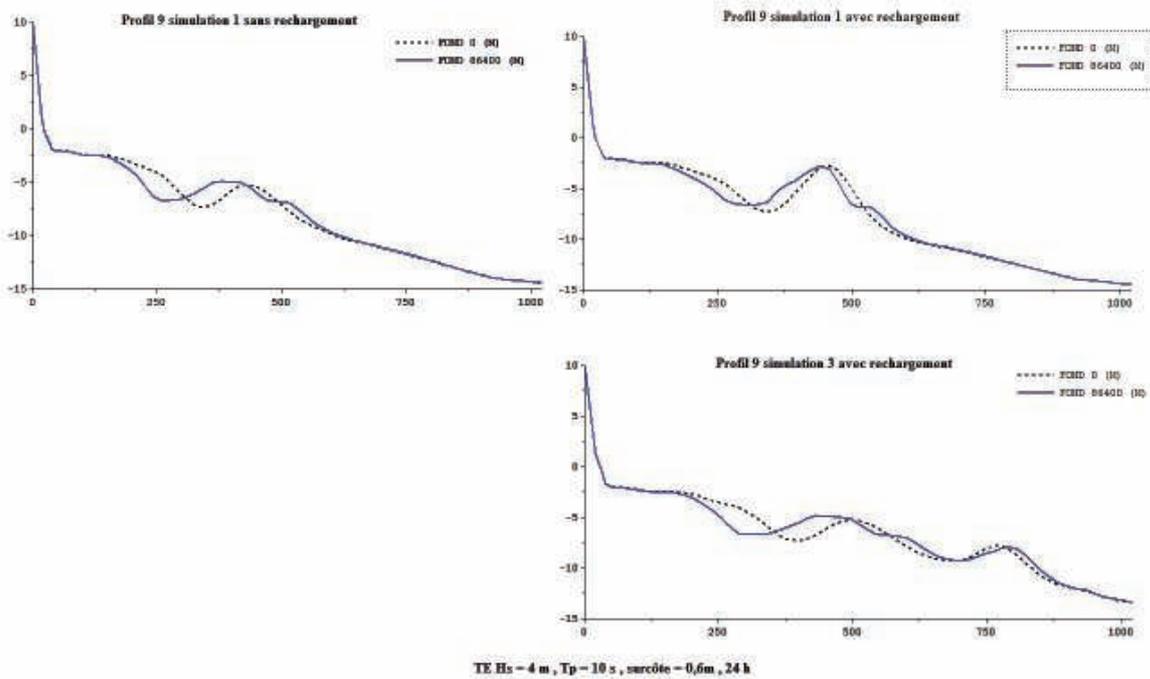


Fig. B.60 : Profil P9 naturel et rechargé avant (trait en pointillé noir) et après simulation (trait bleu continu) pour une situation de tempête exceptionnelle (TE)

Analyse des critères et paramètres

Pour comparer avec Modhys, nous avons aussi calculé le critère $|E_{it} - E_0| / E_0$, les autres critères étant plus difficiles à obtenir, surtout les différents D proposé par Modhys.

Sur les fig. B.61 et B.62, on montre aussi Q_s et sa dérivée par rapport à x (abscisses cross-shore) sur P3 et P9. Dans le cas du profil P3 naturel avec une tempête exceptionnelle, on a un transport Q_s de l'ordre de $1 \cdot 10^{-3}$ en similitude avec la simulation Modhys. Pour le profil P9 (Fig. B.63 à B.66), les Q_s calculé par le modèle Multi1DH-Sisyphé supérieur à celui de Modhys d'un facteur 10. On peut aussi remarquer **que le maximum pour Modhys se situe sur la barre externe rechargée alors que dans le modèle Multi1DH-Sisyphé le maximum est dans la fosse interne avec un deuxième maximum sur la barre externe.**

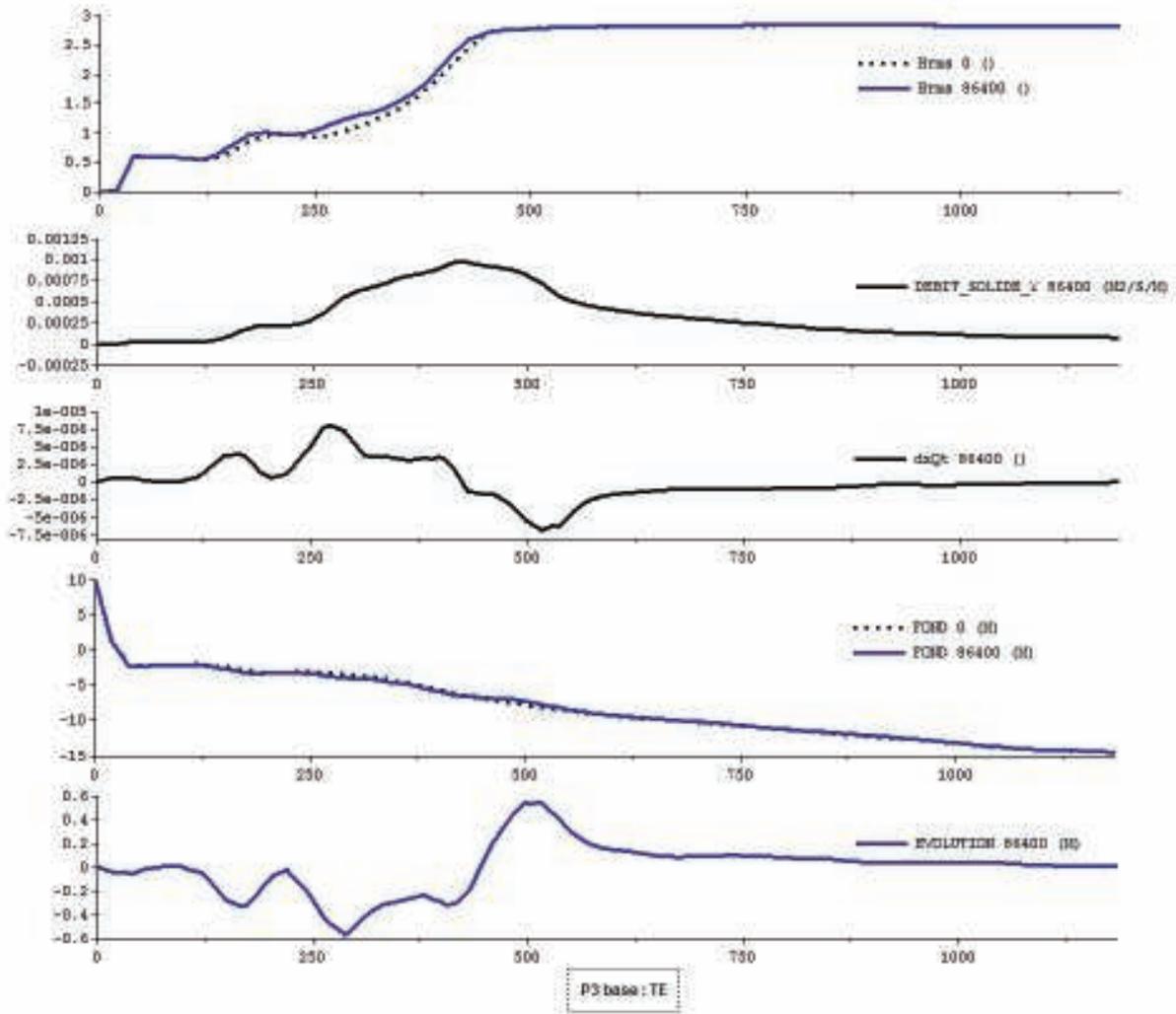


Fig. B.61 : Du haut vers le bas : hauteur de houle $H_{rms}(x)$, flux total de sédiment, gradient horizontal du flux total de sédiment, fond initial (...) et final et évolution (différence entre le fond initial et final) pour le profil naturel P3

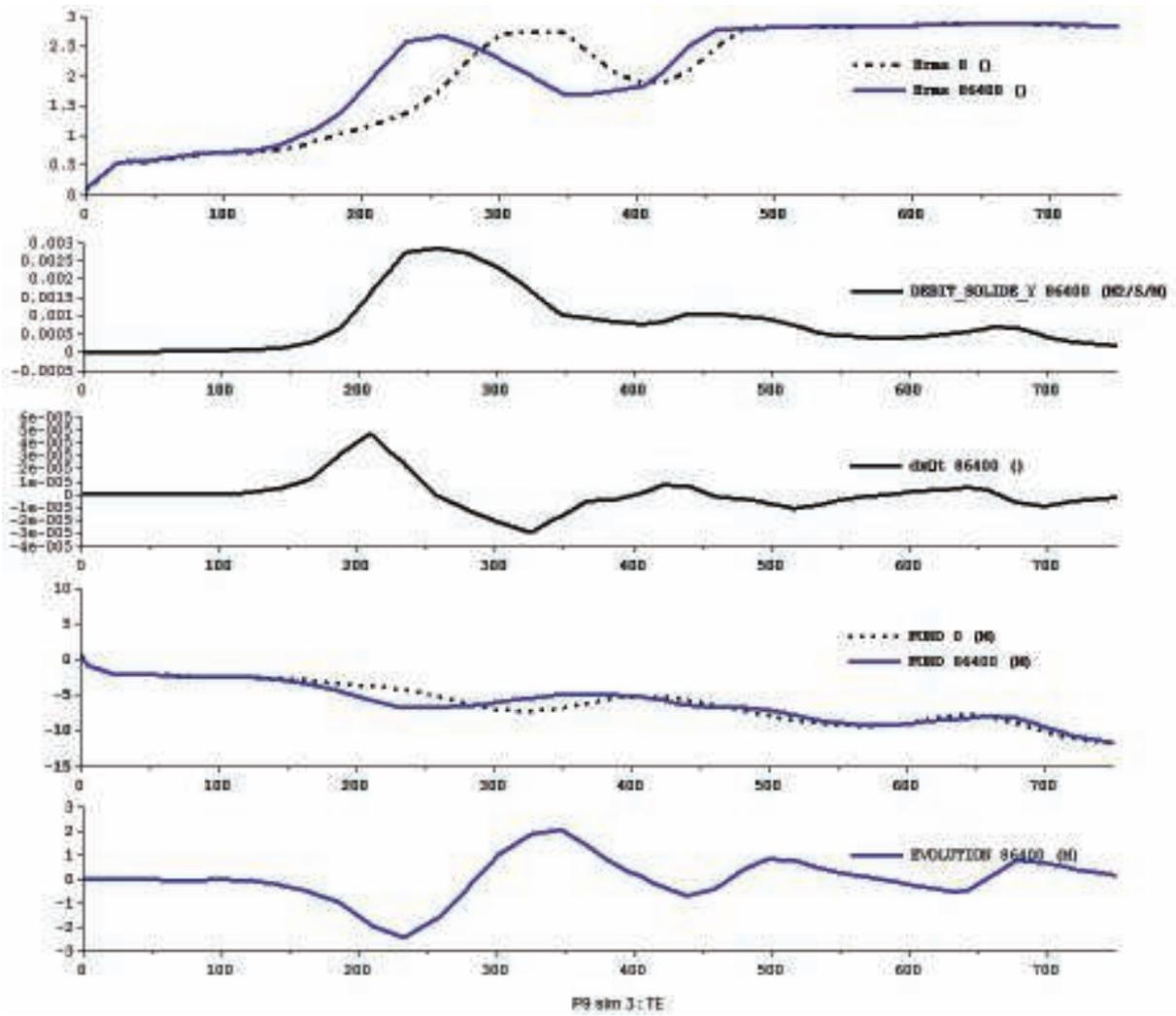


Fig. B.62 : Du haut vers le bas : hauteur de houle $H_{rms}(x)$, flux total de sédiment, gradient horizontal du flux total de sédiment, fond initial (...) et final et évolution (différence entre le fond initial et final) pour le profil 9

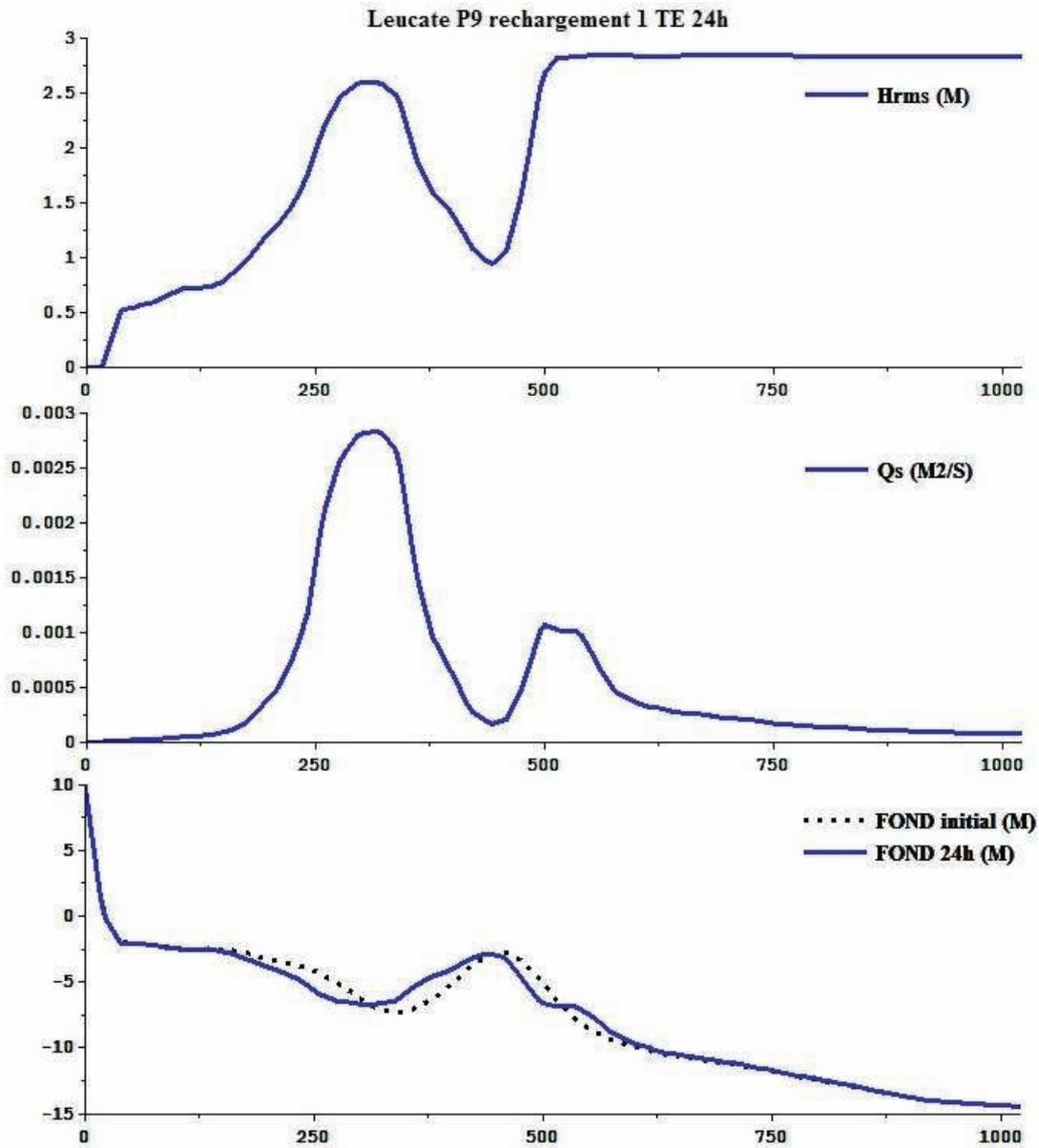


Fig. B.63 : Du haut vers le bas : hauteur de houle $H_{rms}(x)$, flux total de sédiment et fond initial (...) et final pour P9 simulation 1 TE.

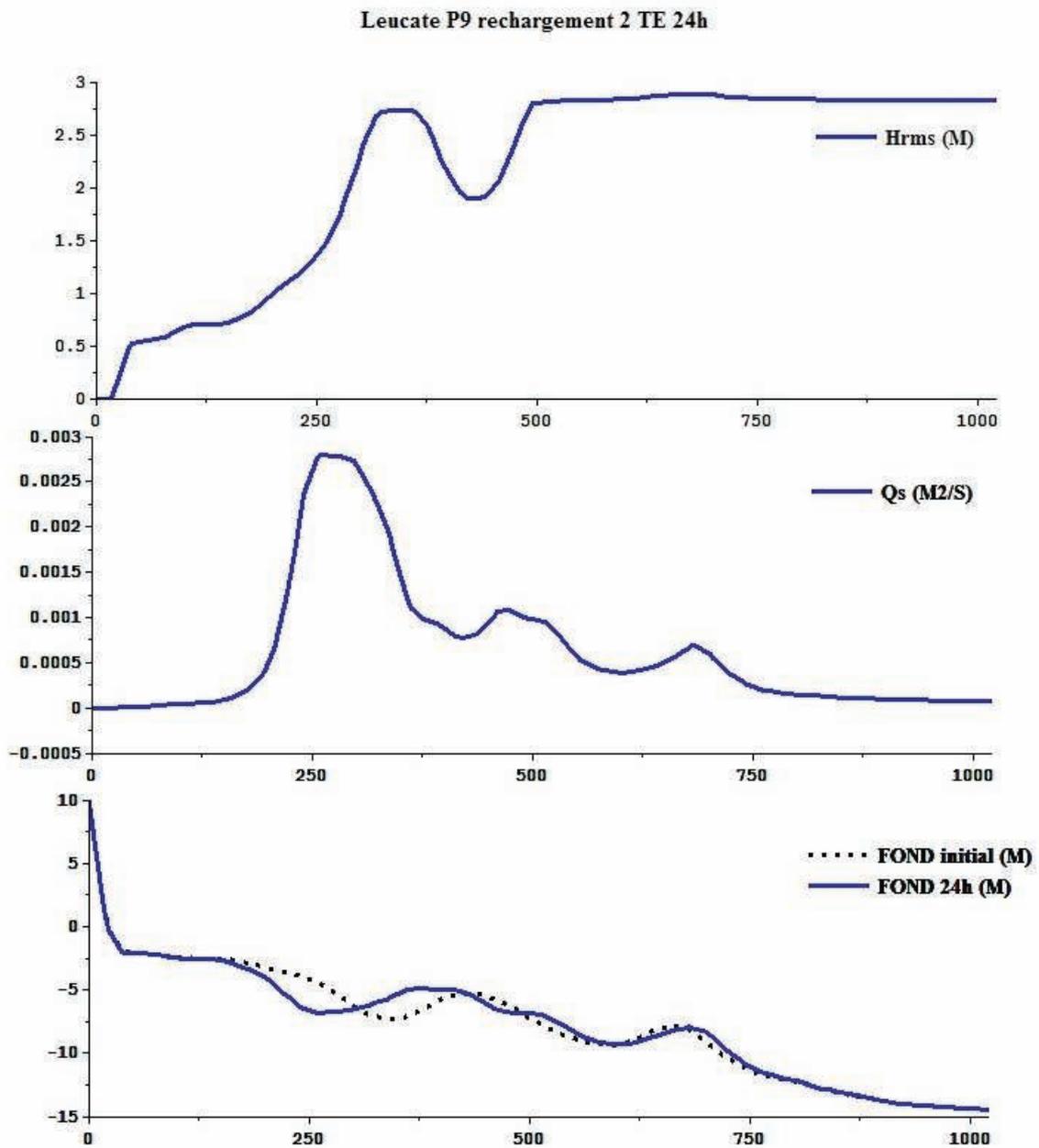


Fig. 64: Du haut vers le bas : hauteur de houle $H_{rms}(x)$, flux total de sédiment et fond initial (...) et final pour P9 simulation 2 TE.

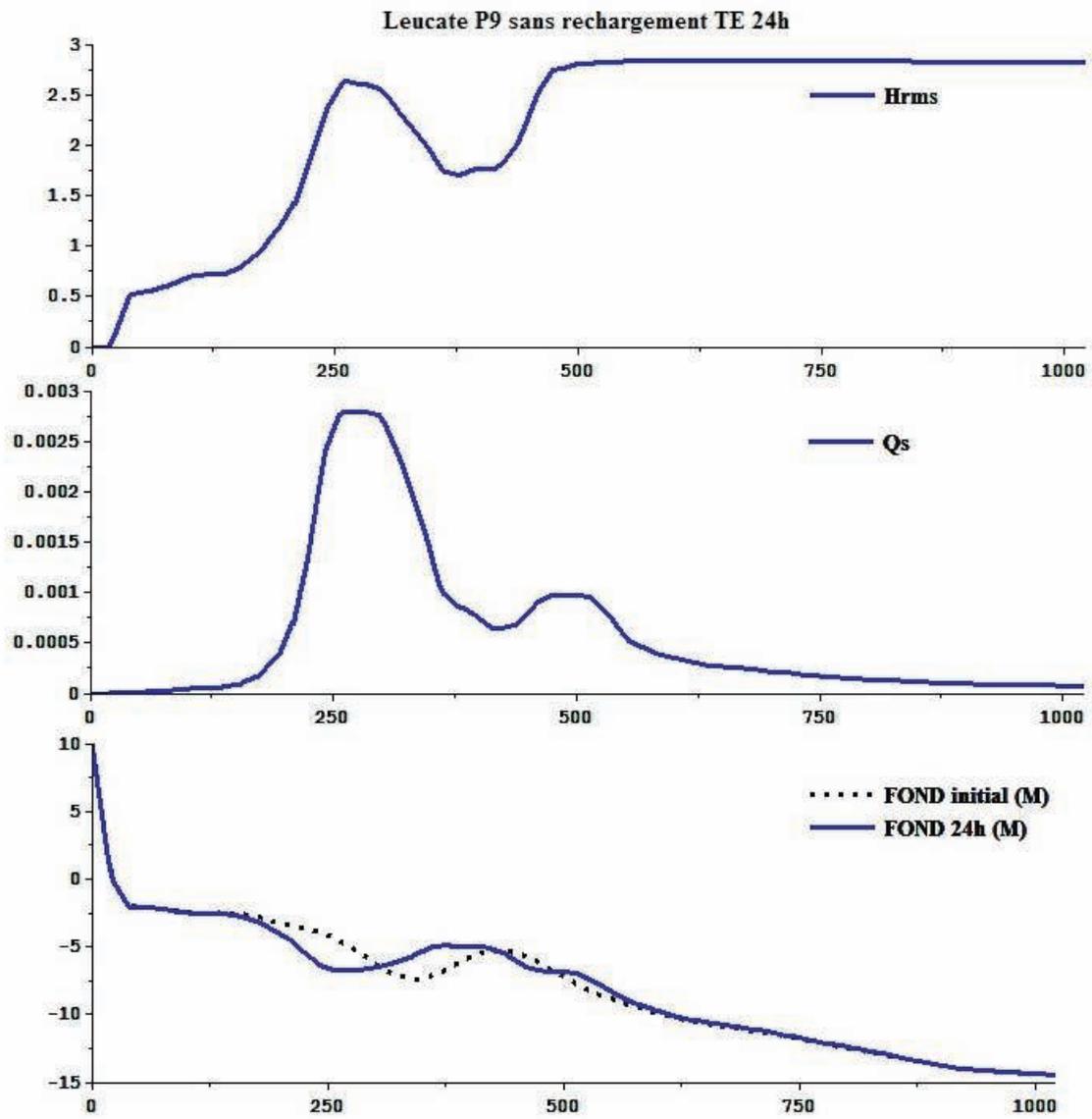


Fig. B.65 : Du haut vers le bas : hauteur de houle $H_{rms}(x)$, flux total de sédiment et fond initial (...) et final pour P9 naturel TE.

Leucate P9 sans rechargement TT 24h

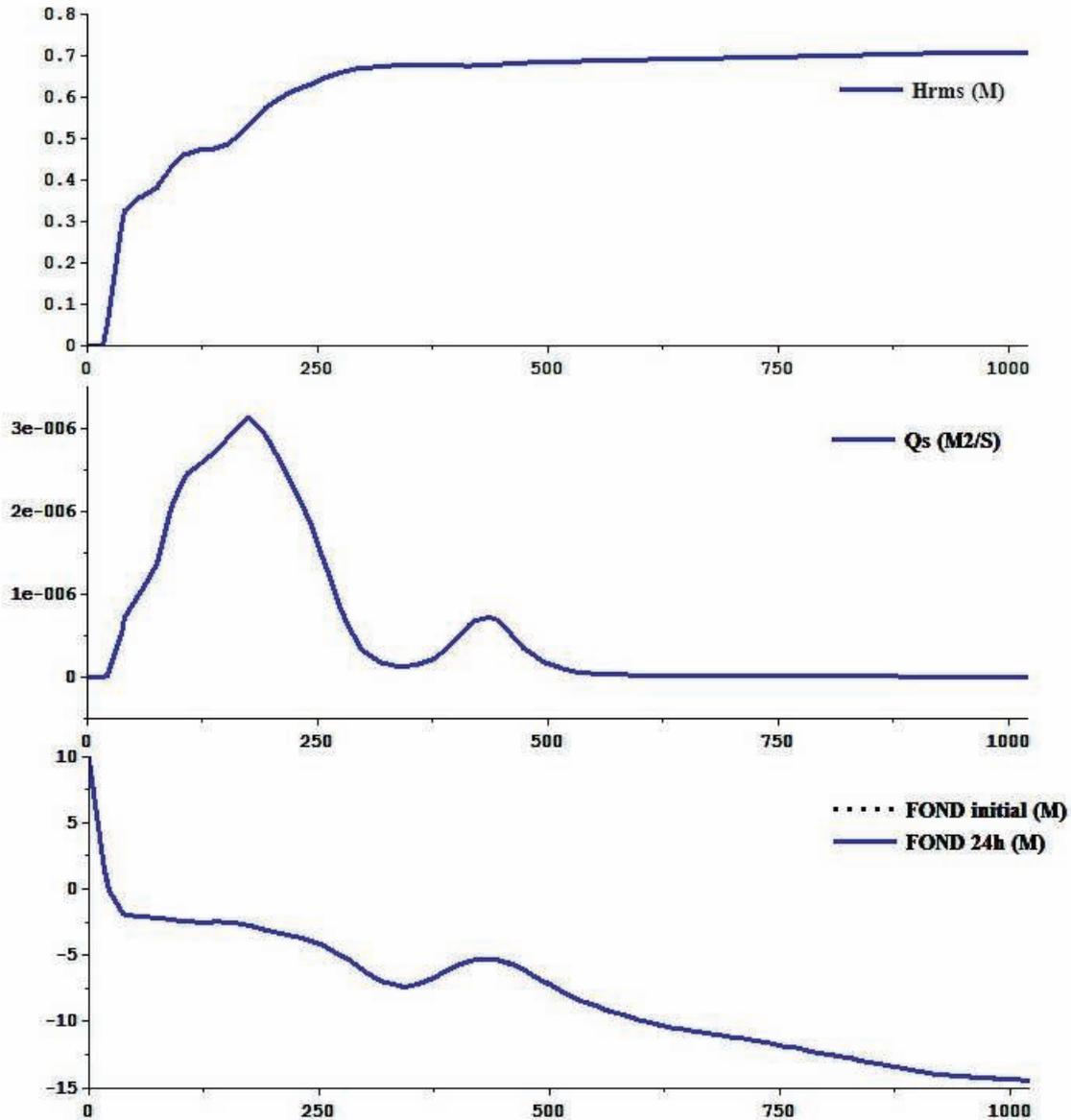


Fig.B.66: Du haut vers le bas : hauteur de houle $H_{rms}(x)$, flux total de sédiment et fond initial (...) et final pour P9 naturel TT.

Etude de l'influence de la granulométrie

La figure B.67 montre la sensibilité du résultat au diamètre du grain d_{50} . La tendance de l'évolution morphodynamique est la même mais l'écart final en 24h entre les deux profils ($d_{50} = 0.3$ mm et $d_{50} = 0.25$ mm) **peut être de quelques mètres**. Il faut donc toujours prendre ces résultats comme des indications d'évolution et non pas comme des estimations qualitatives. Pour cela on résoudra des équations plus complexes avec des calculs 2DH ou 3D. La comparaison entre les différentes formules de transport sédimentaire a été faite sur un profil et un climat de houle sur la plage de Sète (voir partie Plage de Sète) mais ce sont les mêmes conclusions que nous pouvons tirer des comparaisons de formules de transports sédimentaires.

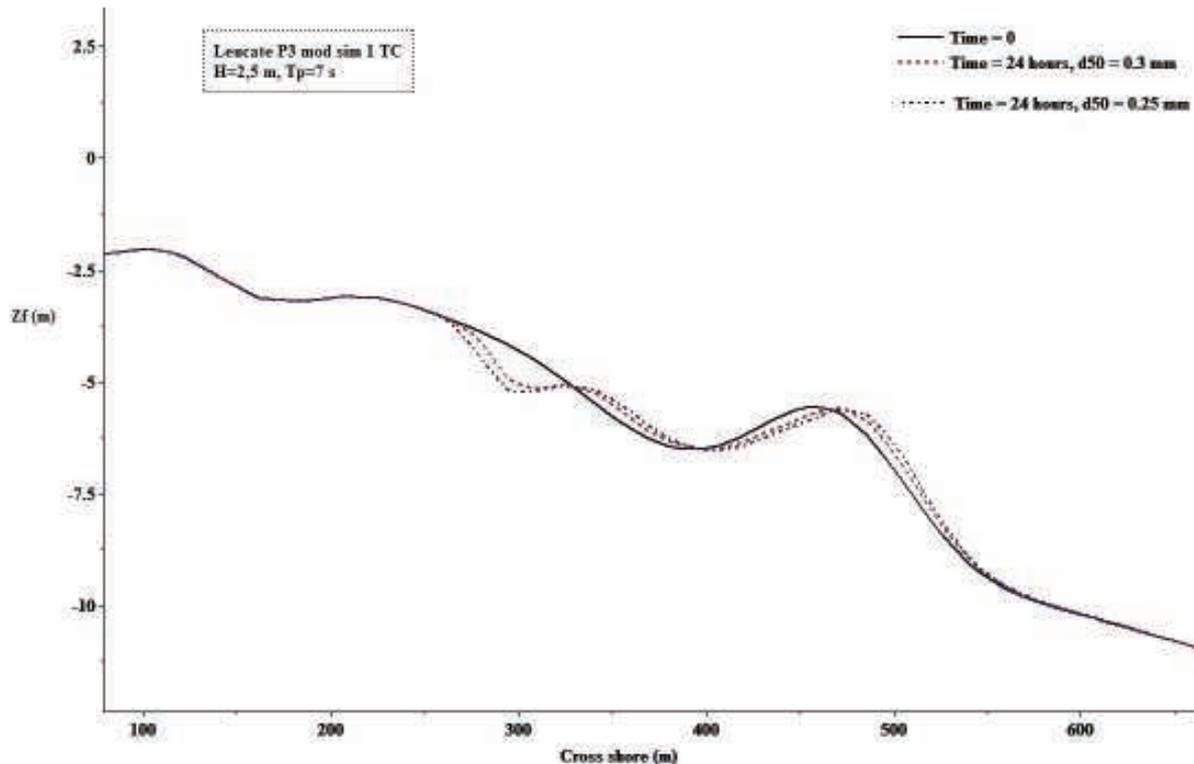


Fig. B.67: 24h d'évolution avec TC pour le profil P3, tireté rouge : $d_{50} = 0,3$ mm et tireté bleu : $d_{50} = 0,25$ mm.

Conclusions

Les résultats obtenus par le modèle Multi1DH-Sisyphé pour Leucate semblent montrer que **les situations de TT et TC n'affectent que peu les profils transversaux de la plage aussi bien naturels que rechargés** bien qu'on puisse observer sur certaines simulations de faibles érosions des revers des barres ou des rechargements. **Ceci correspond bien à ce qui est observé *in-situ* pour les profils naturels.**

Pour les conditions de houle de TE, les profils P3, P7 et P9 rechargés ou non sont modifiés dans leur partie interne mais on observe un maintien du stock de sable entre 250 m et 500 m ou un déplacement peu important vers le large de la barre surnuméraire créée à 750 m du rivage. Il est difficile de faire une distinction entre les réponses obtenues pour des rechargements de barre externe et la création de barres surnuméraires.

La granulométrie du sédiment peut avoir un rôle dans l'ampleur des déplacements sans pour autant changer les comportements simulés.

Si on compare avec les résultats obtenus pour le modèle Modhys, le système de barres de Leucate paraît plus stable dans son ensemble et on n'observe pas véritablement de lissage du système interne, plutôt une érosion revers avec maintien du sable dans le secteur. Modhys majore donc les évolutions morphologiques par rapport au modèle Multi1DH-Sisyphé sur ce site.

▪ A-2 Plage de Sète

Le travail sur la plage de Sète a été réalisé, comme pour Leucate, à l'échelle de tempête de 24h. Grâce aux avancées qui ont pu être obtenues sur l'amélioration des codes en cours de projet et en raison de l'importance de la bonne prise en compte de la durée d'action des conditions d'agitation, il est apparu intéressant de tenter des simulations sur des échelles de temps plus longues de 5 à 20j.

Simulations à l'échelle de 24h

La figure B.68 expose les résultats les plus significatifs pour l'évolution des fonds sur 24h pour un rechargement de barre externe et la création d'une barre surnuméraire sur le profil du 16 novembre 2000, qui sont en concordance avec les conclusions du rapport LITEAU I dans lequel les simulations avaient été réalisées sur un profil idéalisé de la plage de Sète.

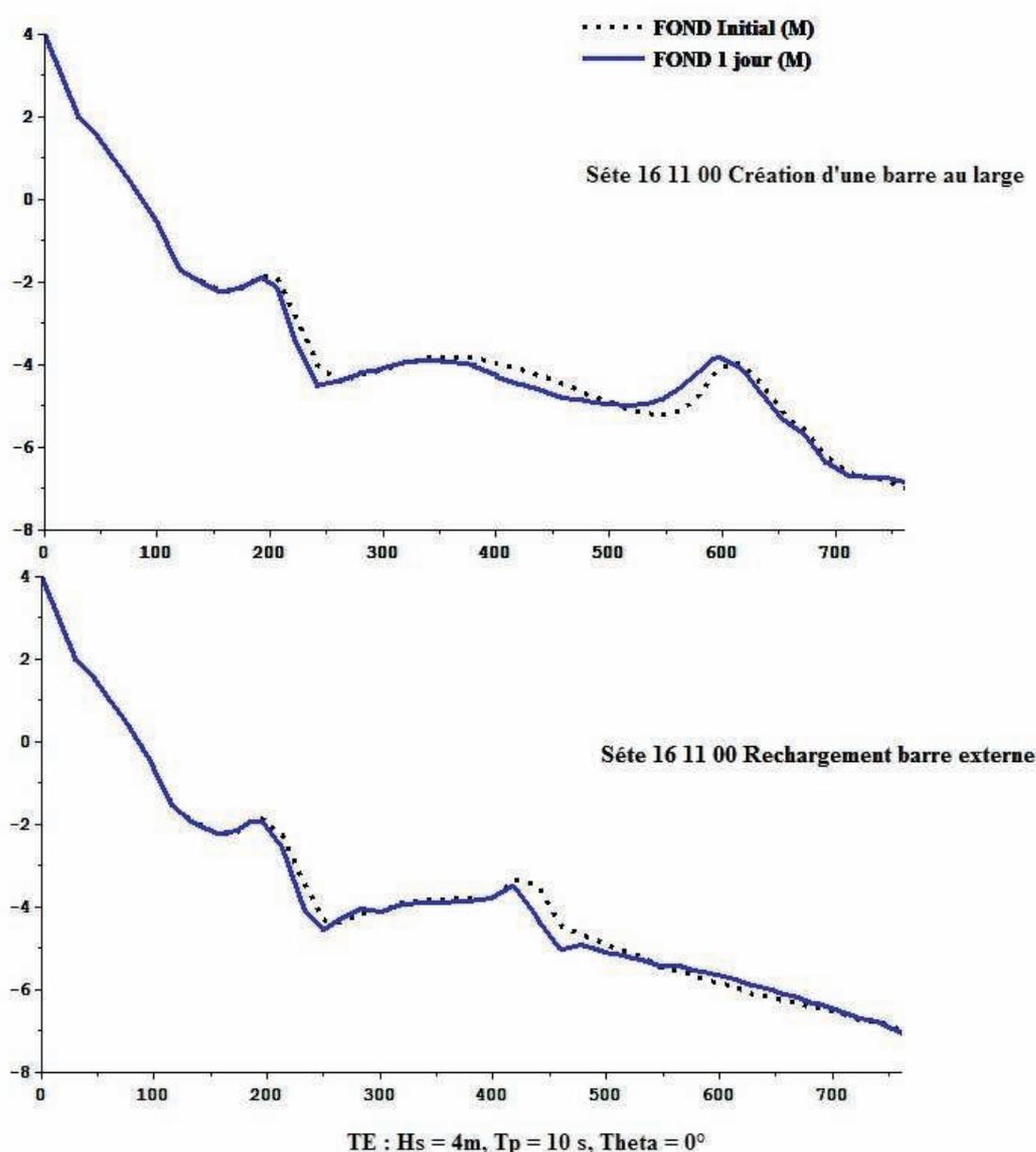


Fig. B.68 : TE sur la bathymétrie du 16 11 00 à Sète avec un rechargement sur la barre externe et création de la barre au large simulé pendant 24h.

Si on analyse les résultats pour le rechargement de barre externe, on peut en conclure que la protection de la plage sera efficace notamment si la barre interne est moins attaquée par les houles. **Dans le cas le plus extrême de la tempête exceptionnelle, la barre interne est érodée ainsi que la barre externe (Fig. B.68). Ces érosions de barres se font sur la face orientée vers le large. L'ampleur de ces érosions reste cependant modérée, les barres ne subissant pas de modifications importantes de leur forme ou de leur position. En conclusion pour de tempêtes de 24h, il semblerait que les rechargements sur les barres externes soient efficaces.**

Pour la création d'une nouvelle barre artificielle au large de la barre externe, on remarque que bien que **les barres interne et externe soient érodées sur leur face externe, les barres restent globalement stables la position de leurs crêtes variant très peu. On remarque aussi que le sable déplacé vers le large est arrêté par la nouvelle barre au large. On peut donc supposer qu'il ne sera pas complètement perdu. De plus, ce phénomène induit une tendance à la migration de la barre surnuméraire vers la côte. Cette tendance pourrait être accentuée par beau temps et plus faible houle. Les conclusions de cette simulation sont donc plutôt positives pour la plage.**

Simulations de tempête durant plusieurs jours

Les conclusions de cette étude pour des tempêtes de 24h conduisent à expérimenter des simulations avec le modèle Multi1DH-Sysiphe sur des durées plus longues pour avoir une meilleure vision des tendances d'évolutions des fonds en fonctions des différents types de rechargements, en se rapprochant le plus possible des forçages réels.

Le premier cas qui a été testé consiste à simuler des TE sur une durée de 5 jours (Fig. B.69), ce qui est peu probable mais permet d'accentuer et de montrer plus clairement les tendances d'évolution des profils de plage sous ce type de contrainte.

On observe alors que pour un rechargement de barre externe, le revers la barre interne est bien érodée même si la barre garde sa position d'origine, alors que la barre externe est plus sévèrement attaquée en subissant une érosion de son revers et une accumulation sur son front qui se traduisent par une migration de la barre vers la côte avec une barre moins bien formée et moins haute, et une exportation de matériel vers le large qui induit la création d'une nouvelle barre plus au large (Fig. B.69).

Le rechargement consistant à créer une barre surnuméraire semble mieux retenir le sable dans la zone des 500m depuis le trait de côte, mais la barre interne est plus sévèrement attaquée, la barre externe subit une forte érosion qui se traduit par une migration vers la côte d'une barre moins bien développée, et que le rechargement externe lui-même migre vers la côte sans subir une perte importante. En conclusion, malgré des modifications de formes importantes sur le profil, la totalité du sable présent sur le profil serait maintenu entre la côte et le rechargement surnuméraire.

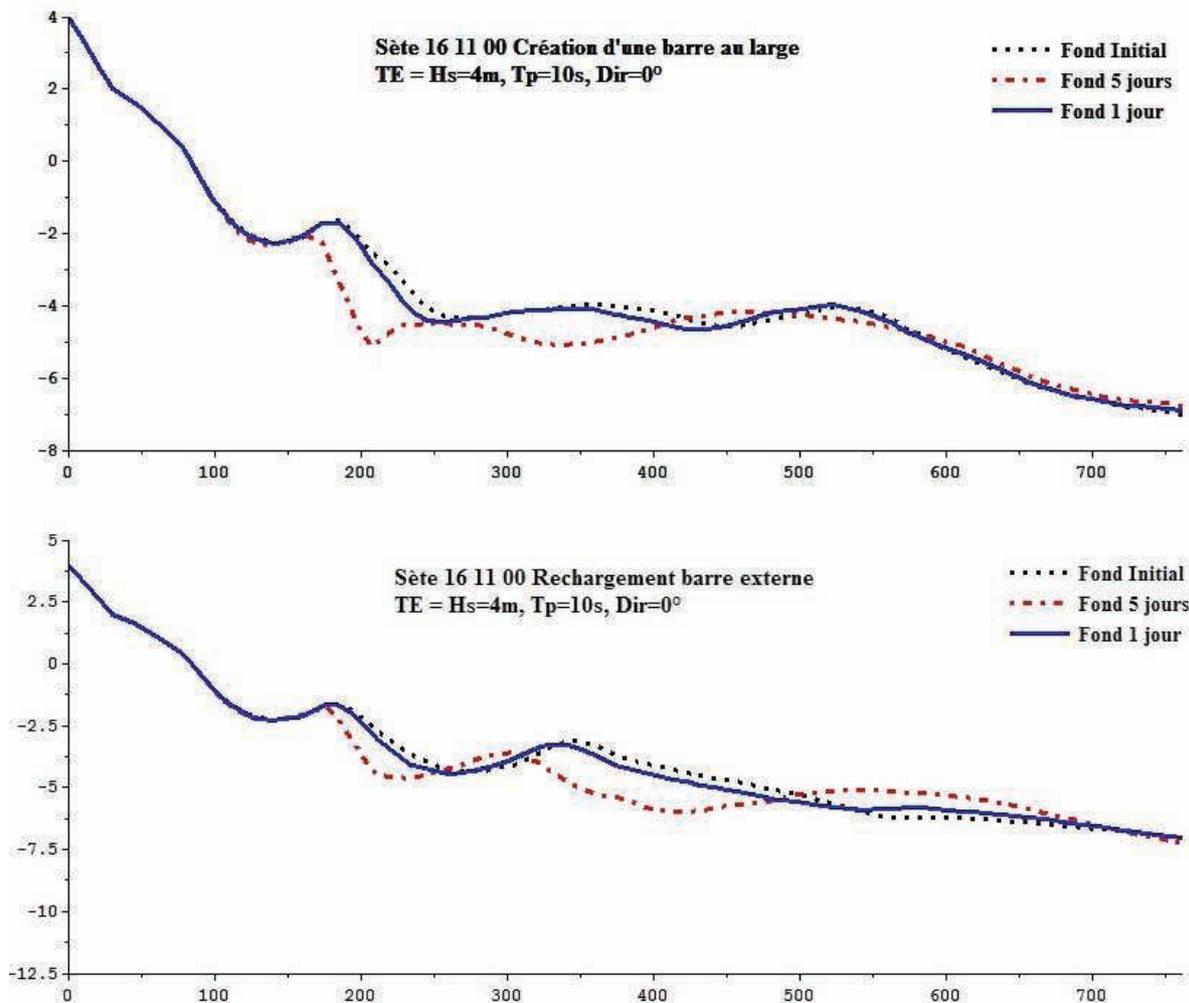


Fig. B.69 : TE sur la bathymétrie du 16 11 00 avec un rechargement sur la barre externe et création de la barre au large simulé pendant 1 et 5 jours

D'une manière générale on voit que **ces conditions hydrodynamiques fortes imposées longtemps les tendances sont plus marquées que pour les tempêtes de 24h.** Les barres peuvent subir des modifications importantes, comme l'affaiblissement de la barre externe rechargée et la création d'une barre plus au large ou encore la forte modification du profil des barres à la côte par rapport au rechargement surnuméraire. **Cependant aucune perte de matériel vers le large ne semble survenir.**

Simulations de tombant de tempête (TT) de 10j à 20j

Le but est d'essayer de reproduire des conditions favorables à la remontée des sédiments vers la plage.

Si on tente de générer des situations de TT pendant une longue durée (10j et 20j) les profils bathymétriques de la plage de Sète ne montrent aucune évolution notable (Fig B.70). Ceci est contraire aux profils d'autres sites du département de l'Hérault simulés pour le programme GESA (programme Interreg IIIC Beachmed-e) pour lesquels on observe des migrations des barres vers la côte, ce qui confirme que tous les profils Leucate ou Sète réagissent avec une certaine singularité. A l'inverse, pour les plages de Leucate et Sète, les rechargements d'avant-côte semblent être plus favorables en situations de tempête que pour les sites Beachmed-e.

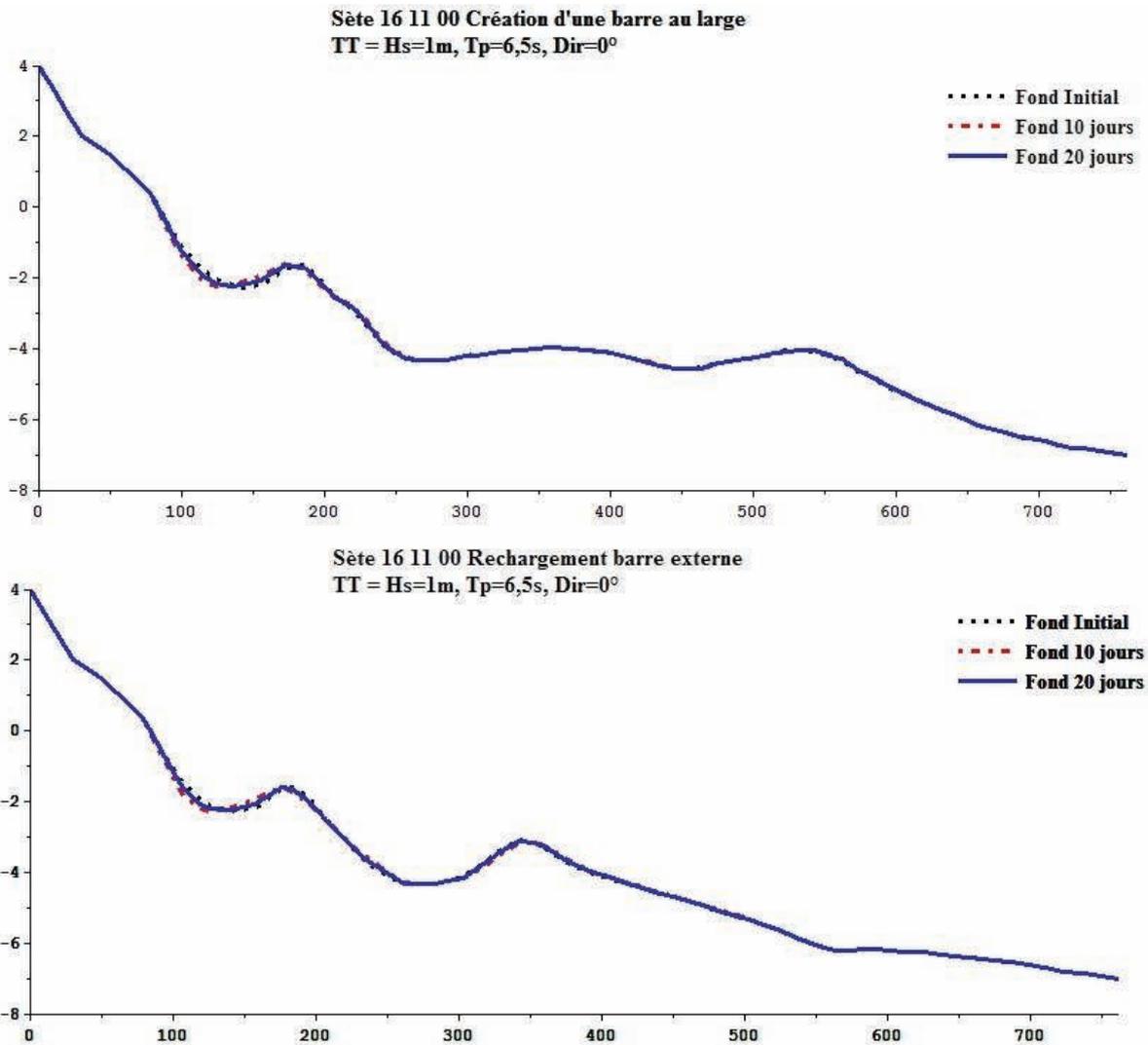


Fig. B.70 : TT sur la bathymétrie du 16 11 00 avec un rechargement sur la barre externe et création de la barre au large simulé pendant 10 puis 20 jours

Les formules de transport

On peut aussi chercher à comparer les réactions des profils si on utilise différentes formules de transport. La figure B.71 montre que toutes les formules de transport donnent la même tendance d'évolution des fonds. Par contre Camenen-Larson semble calculer un taux de transport sédimentaire faible et, à l'opposé, Bailard surestime ce transport par rapport aux trois autres formules (Bijker, Ribberink et Dibjnia-Watanabe).

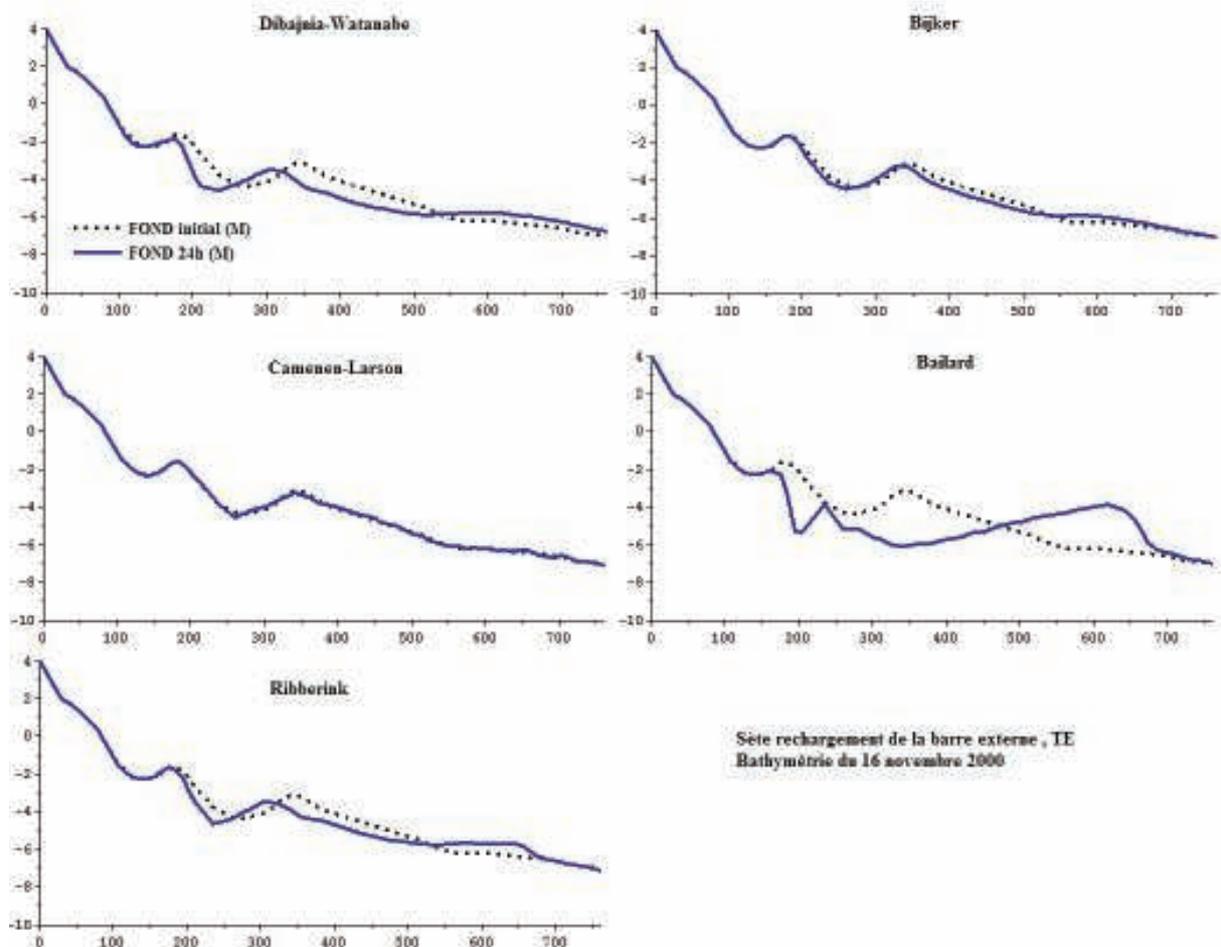


Fig. B.71 : 24h de TE sur la bathymétrie du 16 11 00 avec un rechargement sur la barre externe simulé avec 5 formules de transport sédimentaires différentes.

Conclusions :

A l'échelle de tempête de 24h, les rechargements d'avant-côte de la barre externe et de la création d'une barre surnuméraire pour la plage de Sète semblent être favorables, les rechargements de barre externe paraissant être les plus efficaces.

Si on tente de simuler des conditions de tempête exceptionnelle de 5 jours (TE) anormalement longues, l'avant-côte est beaucoup plus perturbée, notamment le système de barres existant. Le système interne peut être notablement attaqué, cependant aucun transfert important de sédiment ne s'effectue vers le large, rendant l'efficacité des rechargements probable.

Les conditions de TT durant une à plusieurs dizaines de jours ne mettent pas en évidence de remontée de sédiment vers la côte, ce qui est plutôt inhabituel.

Le test de sensibilité des formules de transport montre que les tendances d'évolutions sont identiques pour les différentes formules.

Les profils de Sète sont plus réactifs que ceux de Leucate et les rechargements semblent y avoir un meilleur effet, notamment le rechargement de barre externe. Ces résultats sont proches de ceux obtenus avec le modèle Modhys.

Comparaison de la réponse aux rechargements pour les avant-côtes de Sète/Leucate pour le modèle Multi1DH-Sisyphé

Le site de Leucate est moins mobile que le site de Sète, en concordance avec ce qui a pu être observé pour Modhys et sur le terrain.

Les rechargements paraissent plus favorables à la plage de Sète, les rechargements de barre externe semblant les plus efficaces.

Dans les deux cas, le sable déplacé semble maintenu dans les petits fonds.

Comparaison Sète/Leucate pour le modèle Multi1DH-Sisyphé avec résultats obtenus par le même modèle sur d'autres sites de l'Hérault (Programme GESA Beachmed-e)

Dans le programme Beachmed-e Gesa, quatre avant-côtes du littoral de l'Hérault ont été étudiées. Les conclusions étaient que le rechargement de barre externe semble le plus favorable. Le sable déplacé est par ailleurs maintenu dans la zone des barres et vient les renforcer. Ces conclusions sont identiques pour les deux sites étudiés ici. Par contre, on a pu noter que les conditions de faible agitation TT imposées pendant 10j concourent à une remontée de la barre interne vers la plage ce qui est favorable in fine à un élargissement de la plage émergée. Cette tendance n'est pas observée sur le site de Sète.

B- Simulations 2DH

Objectifs

Le choix a été fait de réaliser des simulations 2DH de façon à mieux appréhender ce qui se passe dans le milieu naturel, notamment pour le cas d'un site très tridimensionnel comme celui de Leucate. De plus, ces calculs 2DH peuvent nous permettre d'analyser les rechargements d'avant-côte de longueur finie parallèlement à la plage, ce qui est plus réaliste.

Présentation des codes 2DH

Trois codes sont utilisés : Artemis pour les houles et obtenir les contraintes de radiation qui vont devenir des termes sources pour le deuxième code Telemac2D pour calculer les courants issues des ces houles. Enfin, un code pour l'évolution des fonds Sisyphe utilisant les vitesses calculées dans telemac2d (Fig. B.72).

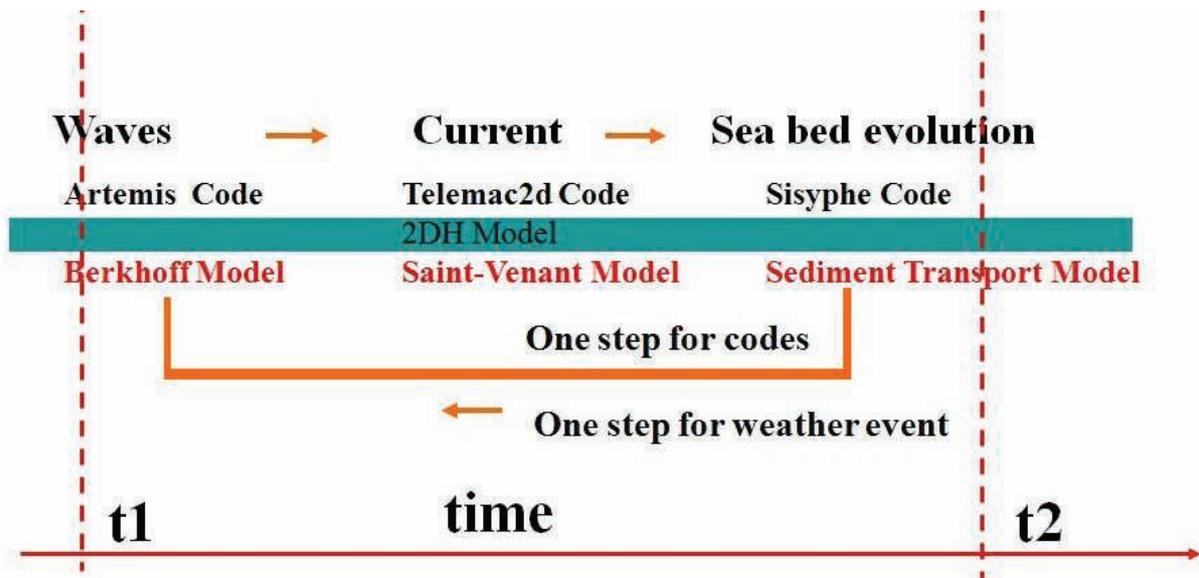


Figure B.72 : Schéma ATS : Descriptif du chainage des 3 codes Artemis (Houle), Telemac2d (courants) et Sisyphe (Transport sédimentaire et évolution du fond) au cours d'une étape de temps.

Les conditions de calculs pour le modèle 2DH ATS sont décrites dans le Tabl. B.3.

	Sète		Leucate	
	Multi1DH-Sisyphé	2DH ATS	Multi1DH-Sisyphé	2DH ATS
Hs, Tp Dir	TC, TE, TT 0°ou 20°	TC, TE, TT 0°ou 20°	TC, TE, TT 0°ou 20°	TC, TE, TT 0°ou 20°
ρ_e	1000	1000	1000	1000
ρ_s	2650	2650	2650	2650
Strickler	55	55	55	55
Pas de temps	$\Delta t = 6s$	$\Delta t_{hydro} = 1s$ $\Delta t_{sédi} = 60s$	$\Delta t = 6s$	$\Delta t_{hydro} = 1s$ $\Delta t_{sédi} = 60s$
d_{50}	0.25 mm	0.25 mm	0.20 mm	0.20 mm

Tableau B.3 : Conditions de calculs pour Multi1DH-Sisyphé et pour le calcul 2DH ATS (Artemis-Telemac2d-Sisyphé)

Comparaison 1DH et 2DH et limites

La modélisation 2DH possède certains avantages, mais le type de modélisation utilisée minore le transport *cross-shore* du fait que dans **ce modèle il n'y a pas de prise en compte du courant de retour ou « undertow »**. Ceci est illustré avec le site de Leucate au niveau du profil P9 lors de conditions de TE pendant une tempête de 24h. On remarque que les évolutions morphologiques obtenues à l'aide du modèle 2DH avec une incidence normale à la côte (Figs. B.73 à B.75) sont très inférieures dans le profil que celle obtenues pour les mêmes conditions avec le modèle Multi-1DH Sisyphé (Fig. B.60), notamment sur l'analyse du profil transversal extrait de la modélisation 2DH (Fig. B.73).

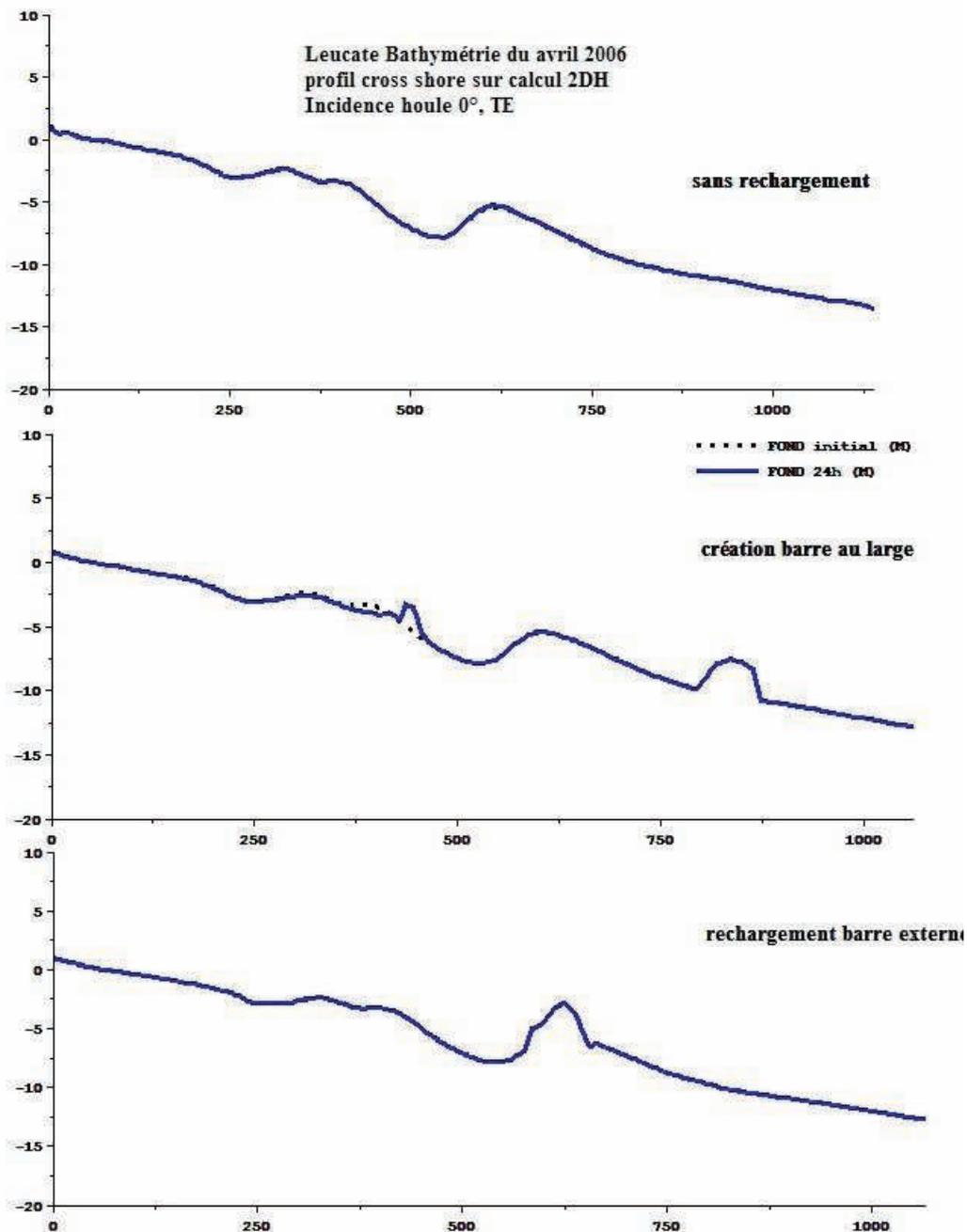


Fig. B.73: Bathy 04_2006, Incidence nulle ($\Theta = 0$) TE $H_s = 4$ m, $T_p = 10$ s, 24 h
Sans rechargement, rechargement barre externe et rechargement au large.

On peut noter que les changements de bathymétrie (Fig. B.74) dans le cas du rechargement au large sont dus aux recirculations de courants horizontaux (Fig. B.75). Ces courants se créent du fait des barres en festons et de l'incidence perpendiculaire des houles. De fait, on va en fait obtenir des évolutions morphodynamiques significatives plutôt avec des houles ayant un angle d'incidence. Ces évolutions sont surtout dues aux déplacements dans la direction *longshore* des différents profils.

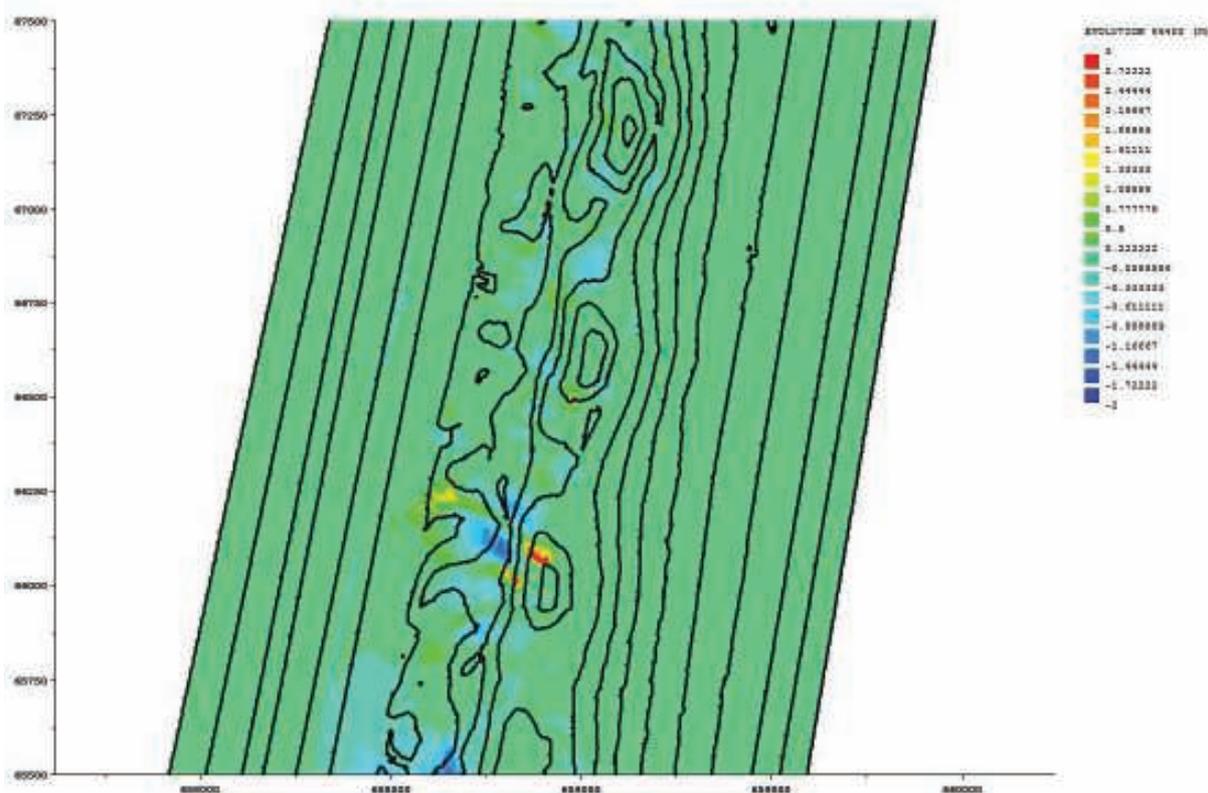


Fig. B.74 : Evolution de la bathymétrie. Bathy 04_2006, Incidence nulle ($\Theta = 0$) TE $H_s = 4$ m, $T_p = 10$ s, 24 h

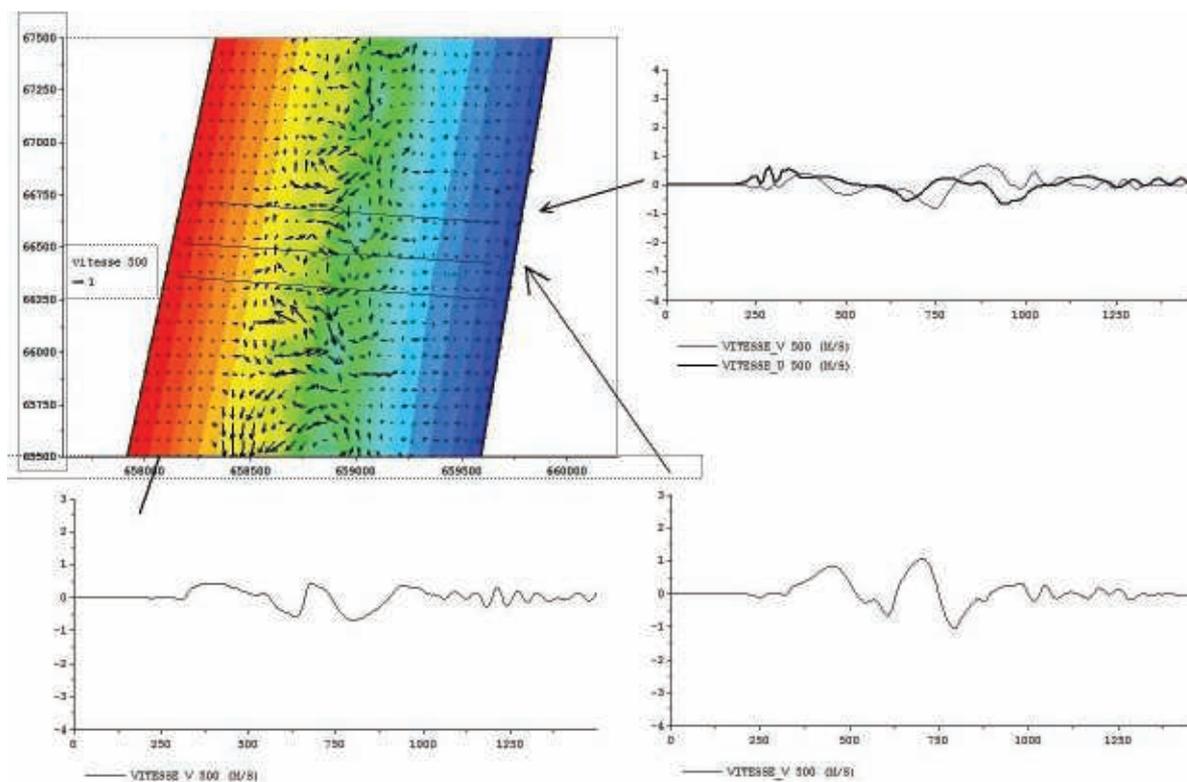


Fig. B.75 : Observation des courants en plan. Bathy 04_2006, Incidence nulle ($\Theta = 0$) TE $H_s = 4$ m, $T_p = 10$ s, 24 h, Champ de vitesses

En conclusion de cet exposé préliminaire sur l'utilisation du modèle 2DH, on démontre que ce type de modèle va répondre aux objectifs fixés, à savoir apporter des informations pour des sites aux bathymétries complexes et prendre en compte les mouvements longitudinaux, mais qu'il minore le transport sédimentaire transversal en raison de la non prise en compte du courant de retour.

▪ B-1 SETE 2DH

La plupart des calculs fait sur Sète en 2DH concernent des études sur des scénarios de houle (appelés coups de mer) plus réalistes que le forçage continu sur 24h utilisé pour les modèles transversaux et de climats de houle sur plusieurs jours (Fig. B.76 à B.79). Ces études ont été faites sans mais surtout avec rechargement.

Ce travail, non prévu initialement, a été rendu possible par l'amélioration des codes. Il permet de se rapprocher de situations plus réalistes que se soit pour le type de tempêtes simulées ou pour les durée d'actions de ces tempêtes. Ainsi le scénario « coup de mer 1 » correspond à une durée de 43h en enchaînant une houle de 2m puis de 4m et une longue situation de tombant de tempête (Fig. B.76). Le scénario « coup de mer 2 » enchaîne les mêmes hauteurs de houle avec une durée plus longue de 67h avec une situation de TT minorée (Fig. B.77). Le scénario « coup de mer 3 » enchaîne sur 43 h des houles de 2,5 m suivies d'une situation de TT (Fig. B.78). Pour répondre au maximum aux observations faites sur le terrain, un scénario « climat de houle » a par ailleurs été créé. Il correspond à l'enchaînement de coup de mer de hauteur 4m entrecoupés de TT pendant 7j (Fig. B.79).

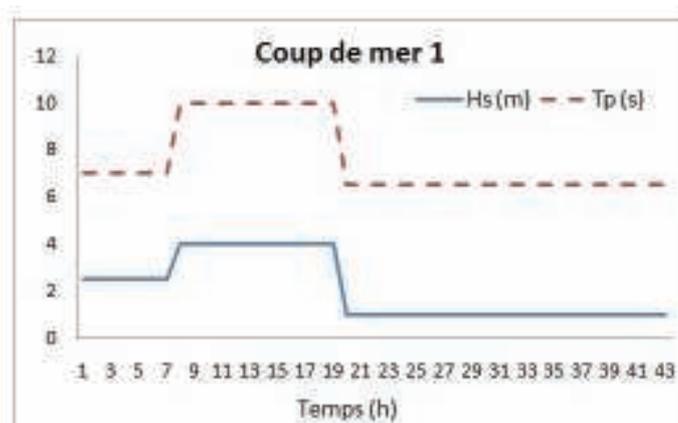


Fig. B.76 : Schéma du coup de mer 1, Hs et Tp en fonction du temps en heures.

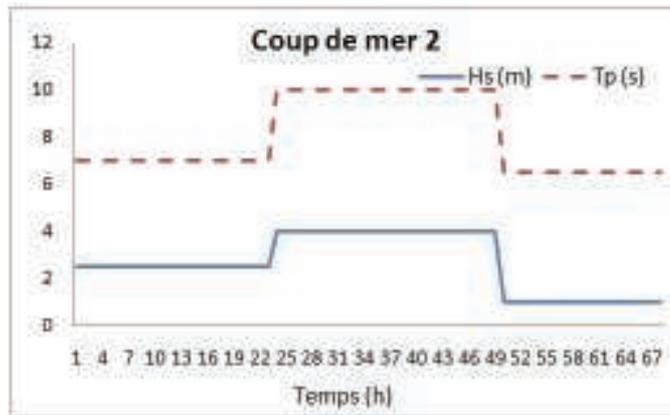


Fig. B.77 : Schéma du coup de mer 2, H_s et T_p en fonction du temps en heures.

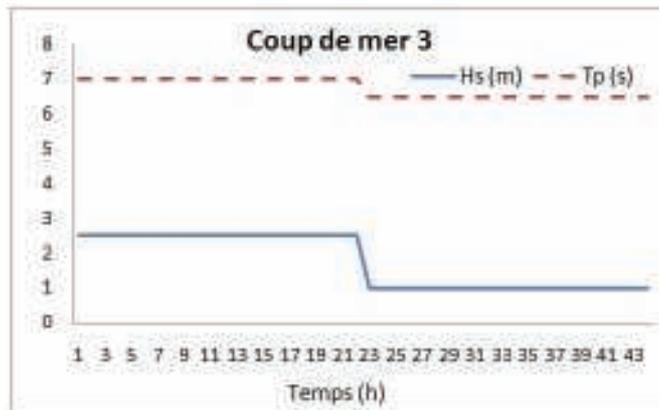


Fig.B.78 : Schéma du coup de mer 3, H_s et T_p en fonction du temps en heures.

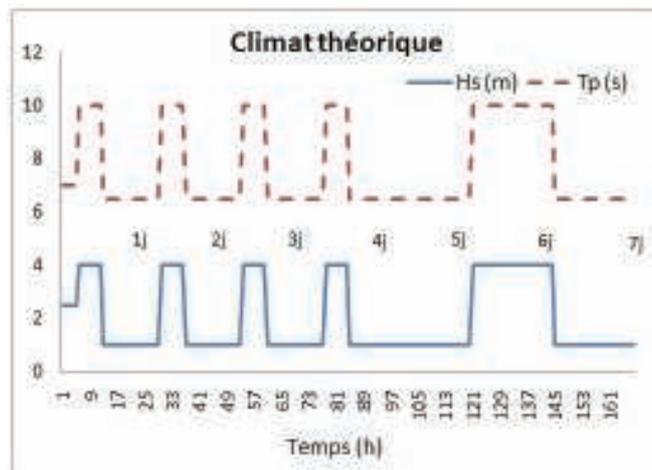


Fig.B.79 : Schéma du climat théorique, H_s et T_p en fonction du temps en heures.

Ce travail sur la succession idéalisée de tempêtes a permis d'aboutir à des études moyen terme de l'évolution des barres, 1) sur le cas naturel, 2) sur des cas de rechargement.

B. 1. 1 Cas naturel :

B. 1.1.1. Bathymétrie initiale 04 11 00, scénarios de coups de mer et climat de houle

Pour une incidence frontale les 3 coups de mer différents ne semblent pas modifier les fonds de façon significative (Fig. B.80). On diffère ici de ce qui peut être observé sur le terrain, en raison de la sous-estimation de l'influence transversale du courant de retour qui induit normalement des migrations transversales des barres vers le large.

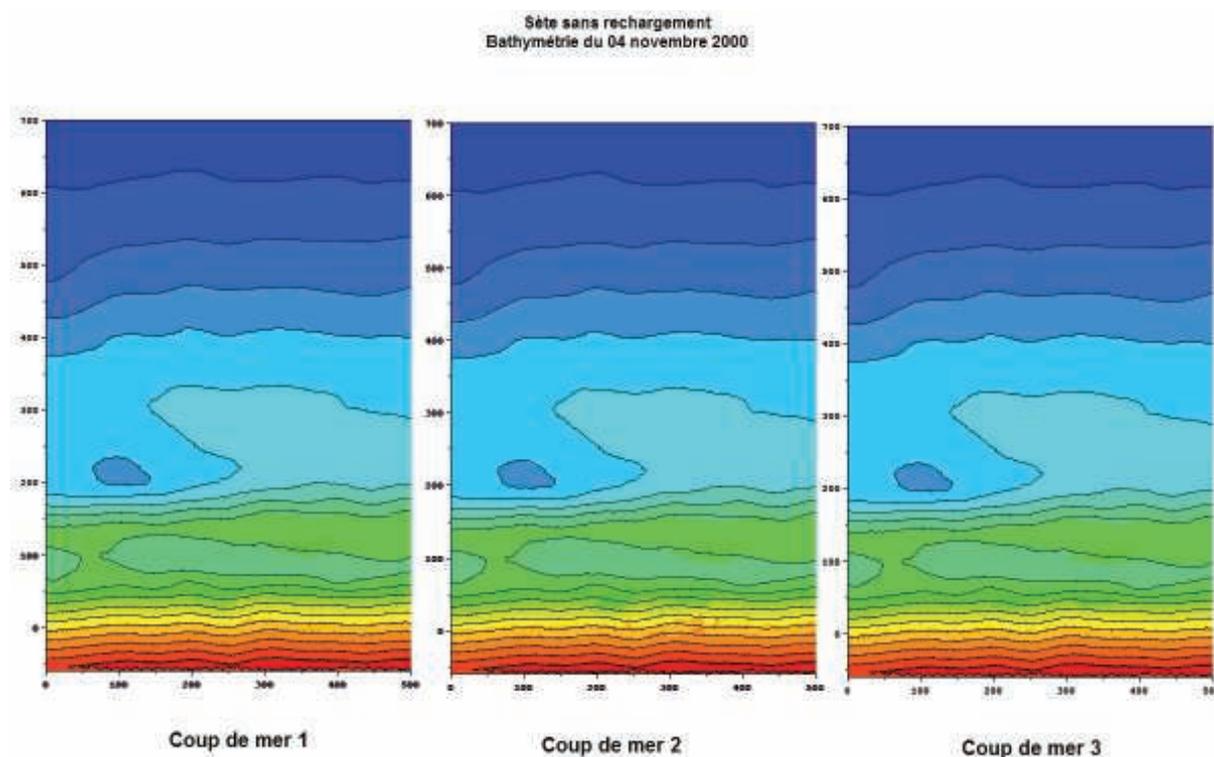


Fig. B.80 : les trois coups de mer pour un angle d'incidence 0° sur la plage naturelle du 04 11 2000. En lignes de contour noires la bathymétrie initiale, en couleur la bathymétrie finale.

Pour des incidences obliques, le coup de mer 1 avec un angle d'incidence 20° , qui correspond à 160° N sur le site, induit des courants longitudinaux mais n'implique pas une évolution significative de la bathymétrie (Fig. B.81). De même une combinaison du coup de mer 3 avec une incidence nulle (houle perpendiculaire à la plage) suivi du coup de mer 1 avec une incidence 20° ne modifie pas beaucoup la bathymétrie malgré des vitesses longitudinales de l'ordre du mètre par seconde. Ces courants se situent surtout dans la fosse interne.

**Sète sans rechargement
Bathymétrie du 04 novembre 2000**

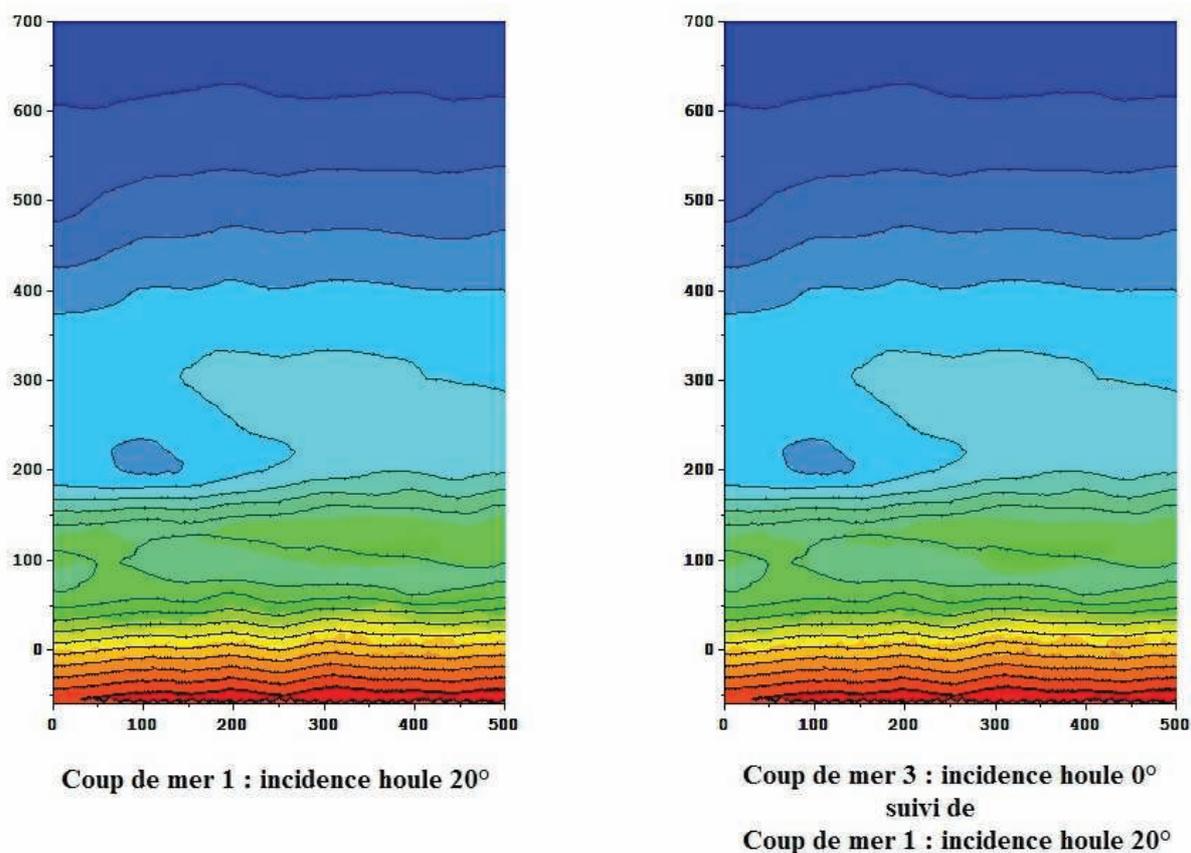


Fig. B.81 : Différents coups de mer et angle d'incidence sur la plage naturelle du 04 11 2000. En lignes de contour noires la bathymétrie initiale, en couleur la bathymétrie finale.

Pour un scénario de climat théorique avec une houle frontale surtout marqué par de longues périodes de tombant de tempête TT, la barre interne est légèrement modifiée en la déstructurant et crée de mini-tombolo dans la fosse interne (Fig. B.82). La tendance est plutôt à l'avancée de la barre interne vers la côte

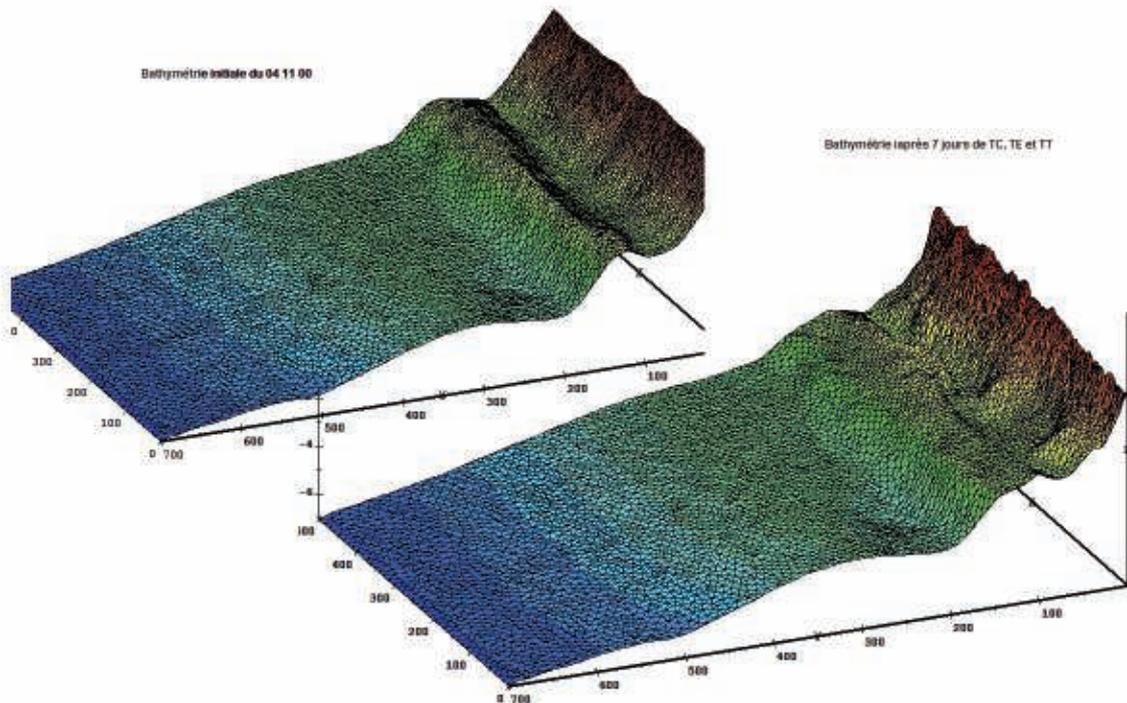


Fig.82: Evolution après 7 jours de climat théorique, incidence de la houle 0° (frontale) sur la bathymétrie initiale du 04 11 2000.

Conclu pour Sète 2000 cas naturel

Les scénarios de coup de mer 1 à 3 ne modifient pas significativement l'avant-côte, par contre le climat de houle imposé sur 7 jours entraîne des modifications significatives du système interne notamment par des connexions avec la plage. Ceci semble démontrer que le modèle est capable de simuler des phases de remontée de sédiment lors des situations de TT, ce qui est encourageant pour passer ensuite à des simulations des cas de rechargements.

B.1.1.2 Bathymétrie initiale 1999, simulation de climat théorique de houles dans les trois directions (2 obliques opposées et une frontale)

En imposant le climat théorique avec une incidence oblique, un segment perpendiculaire à la direction de la houle et parallèle aux courants moyens générés se crée (Fig. B.83). Cela correspond aux observations faites sur le terrain. Ceci confirme que le modèle en utilisant des climats de houle sur 7 jours est capable de simuler les situations réellement observées sur le terrain.

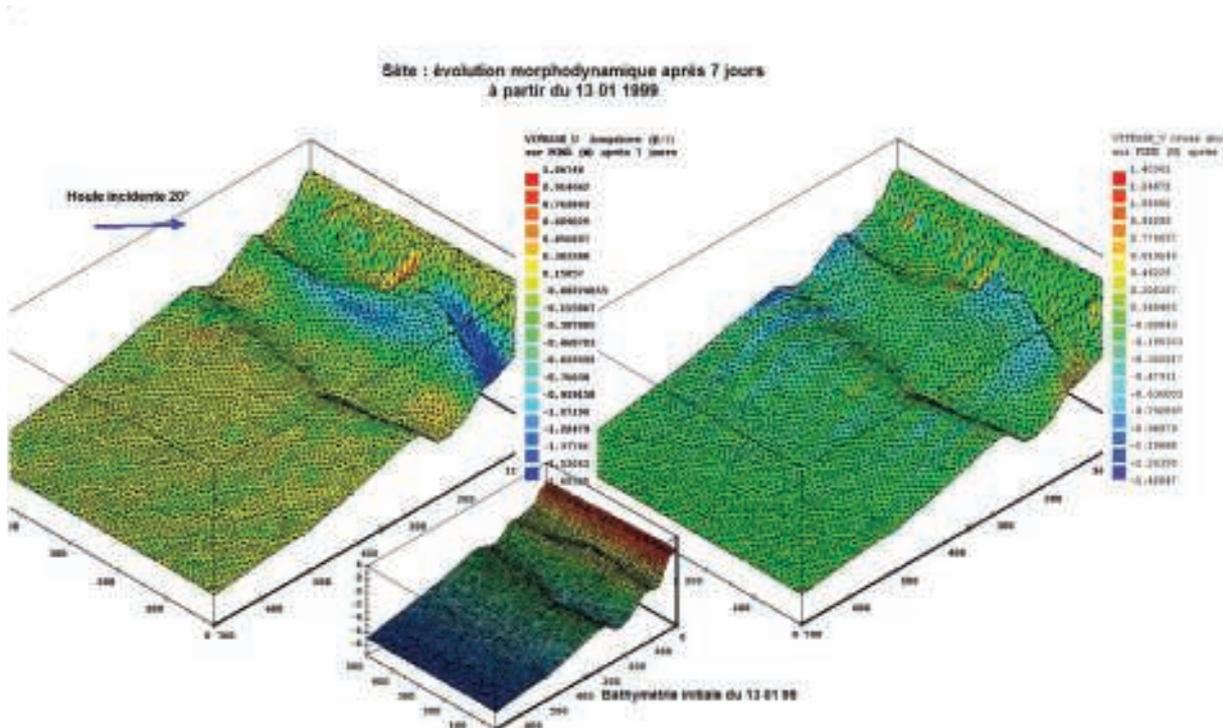


Fig. B.83 : Evolution après 7 jours de climat théorique, incidence de la houle 20° sur la bathymétrie initiale du 13 01 99, coloriée par les vitesses U longshore (dessin de gauche) et les vitesses V cross shore (dessin de droite).

Si on impose maintenant ce même climat avec une incidence opposée, les modifications sont peu importantes et la barre à tendance à migrer vers le sud (Fig. B.84).

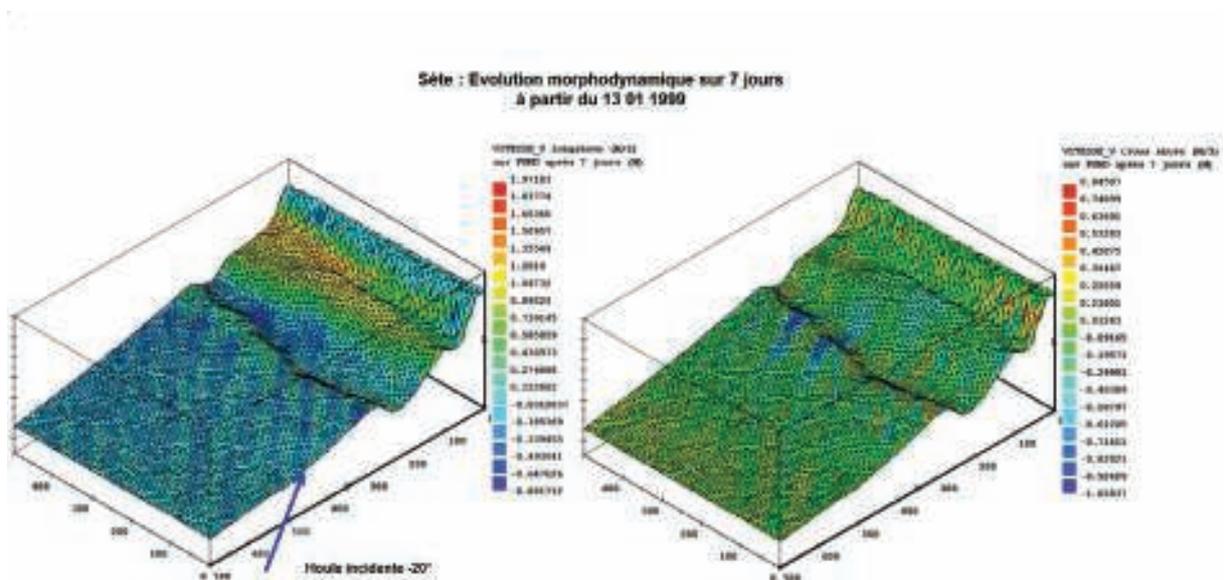


Fig.B.84 : Evolution après 7 jours de climat théorique, incidence de la houle -20° sur la bathymétrie initiale du 13 01 99, coloriée par les vitesses U longshore (dessin de gauche) et les vitesses V cross shore (dessin de droite).

Pour une houle frontale, on n'observe que peu de modifications (Fig.B.85).

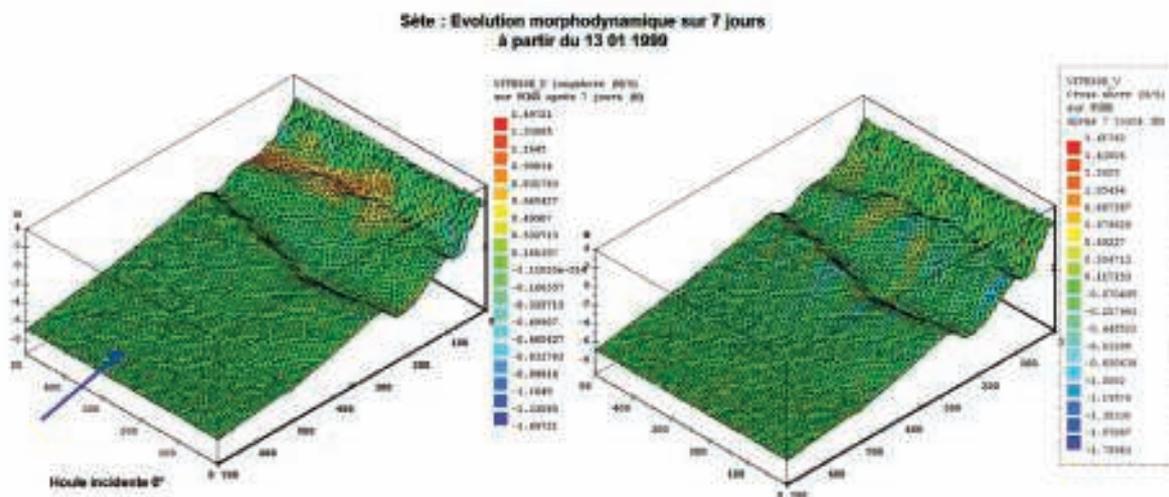


Fig.B.85 : Evolution après 7 jours de climat théorique, incidence de la houle 0° frontale sur la bathymétrie initiale du 13 01 99, coloriée par les vitesses U lonshore (dessin de gauche) et les vitesses V cross shore (dessin de droite).

Conclu pour Sète 1999 cas naturel :

Les houles frontales et -20° créent surtout une légère migration de la barre interne vers le sud alors que l'incidence 20° remodèle cette barre interne de façon significative. Les vitesses sur la barre interne et dans la fosse sont entre 0,5 et 1,5 m/s ce qui est réaliste par rapport aux ordres de grandeurs des vitesses mesurées sur site.

Conclusion générale pour le cas naturel

Plus on augmente les durées de simulations en s'appuyant sur des climats de houle, plus on observe d'évolutions. Les simulations ont l'air pertinentes et en concordance avec le terrain si l'incidence de houle est oblique.

On peut donc passer au même type de travail avec des bathymétries rechargées.

B.1.2 Simulations avec rechargement :

B.1.2.1- Rechargement surnuméraire, houle frontale

Scénarios de coups de mer

Avec le rechargement surnuméraire au large la plage subit plus de changements morphodynamiques (Fig. B.86). C'est le coup de mer 2 qui est le plus morphogène à la fois par la création de petit tombolo dans la fosse interne et aussi par une faible destruction de la face offshore de la barre de rechargement.

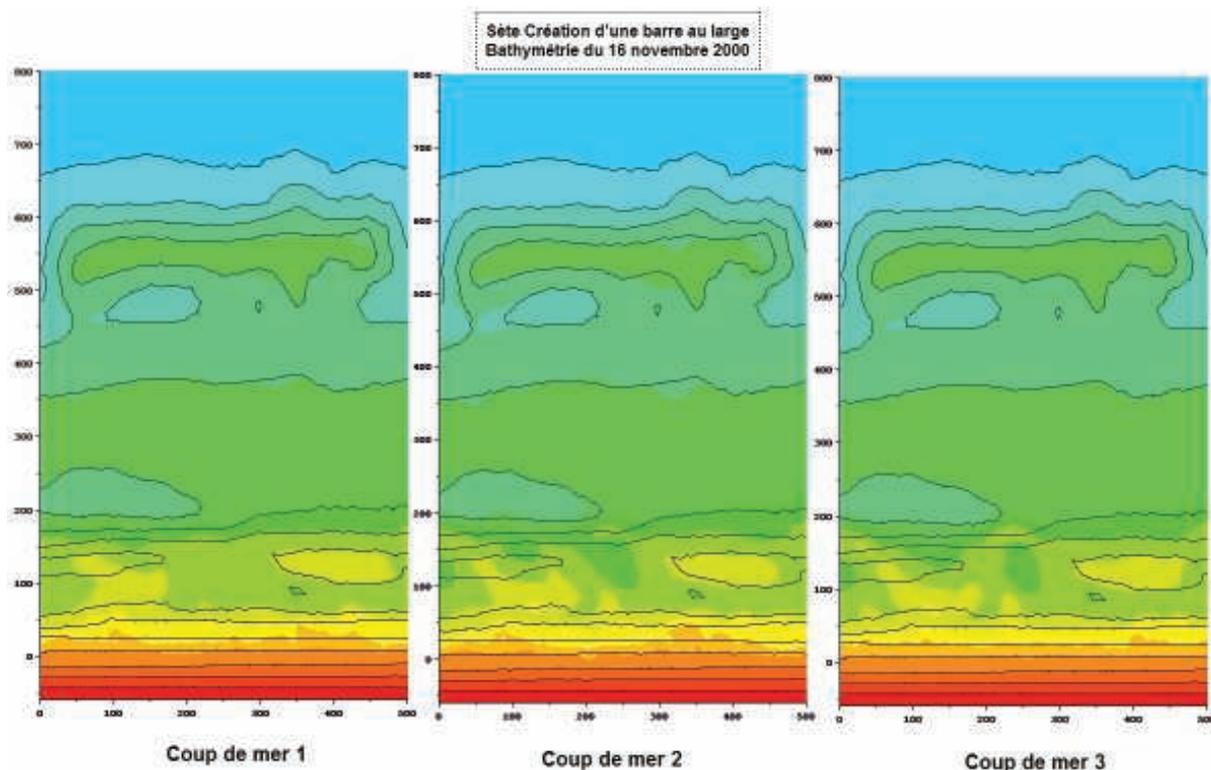


Fig. B.86 : Les 3 scénarios de coups de mer pour un angle d'incidence 0° sur la plage du 16 11 2000 avec le rechargement surnuméraire au large. En noir bathymétrie initiale, en couleur bathymétrie finale

Climat de houle

On observe la création de tombolo dans la fosse interne due aux recirculations des courants créés par la barre externe (Fig. B.87). Il y a très peu de déplacement de la barre surnuméraire comme dans les simulations Multi1DH-Sisyphé. On peut constater une légère destruction de la barre au large. L'évolution n'est pas très différente du scénario coup de mer.

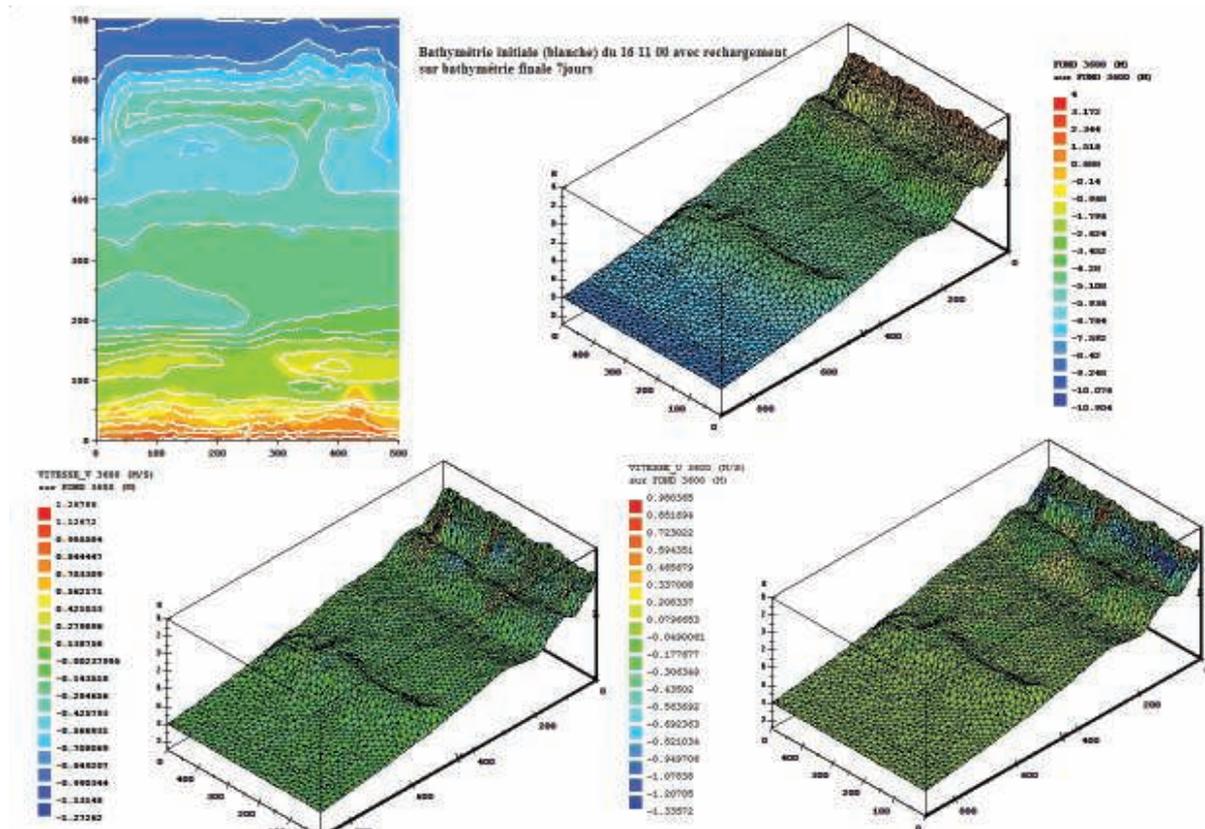


Fig. B.87 : Evolution après 7 jours de climat théorique, incidence de la houle 0° frontale sur la bathymétrie initiale du 16 11 00 avec création d'une barre au large, coloriée par les vitesses U lonshore (dessin de droite) et les vitesses V cross shore (dessin de gauche).

B.1.2.2- Rechargement surnuméraire, houle oblique, TE 3 j

Comme sur la figure avec les houles frontales on crée plusieurs tombolos dans la fosse interne qui contribuent à un élargissement de la plage (Fig. B.88). Du fait de l'incidence de la houle, il y a une migration *longshore* de toutes les entités sédimentaires : les tombolos, les barres internes et externes et aussi la barre au large. Pour autant la barre interne normalement semble à ces forçages importants ne subir pas de destruction ou de phase de recul (Fig. B.89).

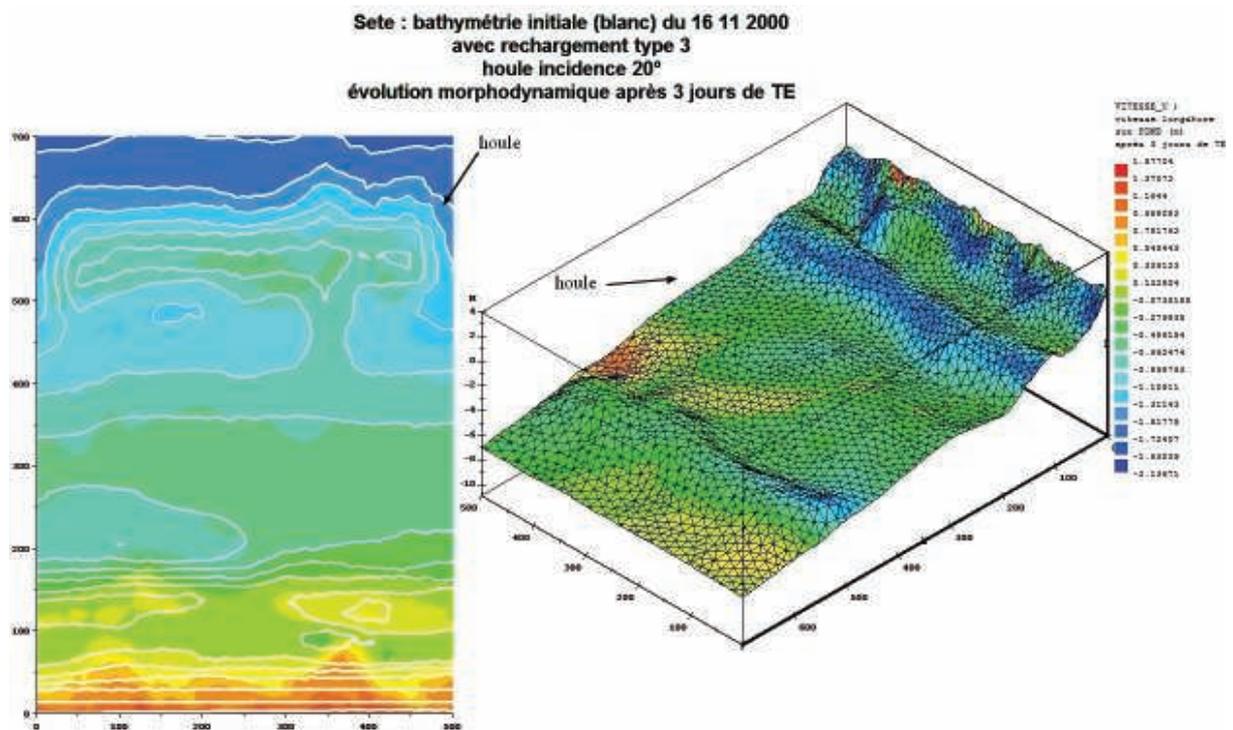


Fig. B.88 : Evolution après 3 jours de TE, incidence de la houle 20° sur la bathymétrie initiale du 16 11 00 avec création d'une barre au large, coloriée par les vitesses U longshore.

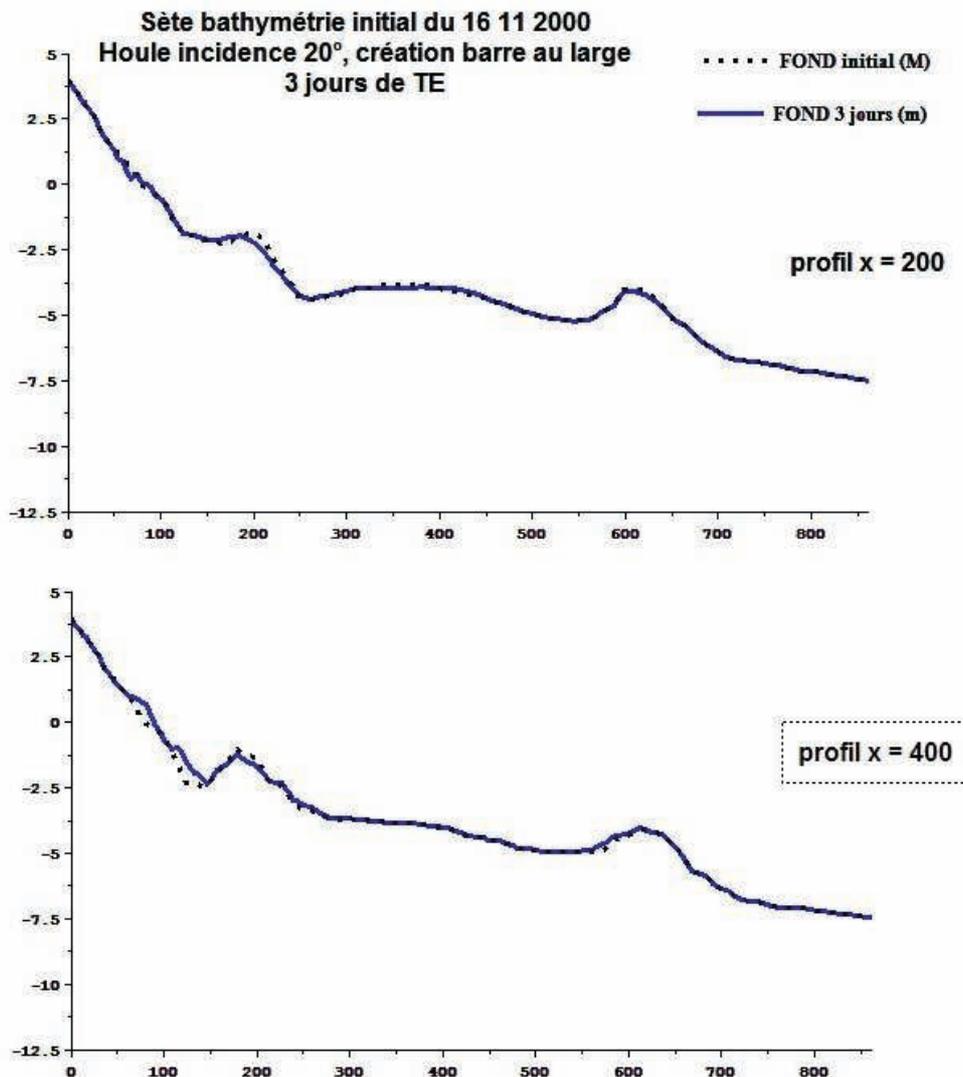


Fig. B.89 : Evolution des profils x=200 et x=400 pendant 3 jours de TE, incidence 20° sur la bathymétrie initiale du 16 11 00.

Conclusion pour les simulations de rechargement à Sète avec le modèle 2DH

Pour les rechargements surnuméraires, les houles frontales simulées pour les scénarios de coups de mer et de climat théorique sont sensiblement identiques. On observe création de tombolo entre la barre interne et la plage et légère déstructuration du rechargement surnuméraire sans pour autant observer de modifications de grande ampleur.

Pour des houles houle oblique TE pendant 3j, on constate aussi la formation de ces tombolos, accompagné d'une migration *longshore* des corps sableux. Le profil transversal se comporte bien face au forçage imposé, on n'observe pas d'érosion de la barre interne. Le rechargement surnuméraire semble donc plutôt favorable au site de Sète, notamment lors des conditions de tempête exceptionnelle.

▪ B-2 Leucate

B. 2.1 Cas naturel :

Le but est de valider le modèle sur un cas naturel en comparant avec les données *in situ*. Des données de 2007 et 2006 sont utilisées.

II. 2.1.1. Simulations pour les données 2007

Une situation de TT proche de situation observée *in situ* est modélisée à partir des données bathymétriques obtenues en 2007 (Fig. B.90). La figure B.90 met de vérifier que les calculs des courants issus des houles pendant 24 h sont cohérents avec ceux mesurés *in situ* à l'échelle d'une faible tempête. Adloff (2008) mesure les vitesses à environ 50 cm/s, on voit sur la figure 18 que les vitesses calculées et le long d'une ligne passant par les cornes des barres en croissant sont du même ordre de grandeur.

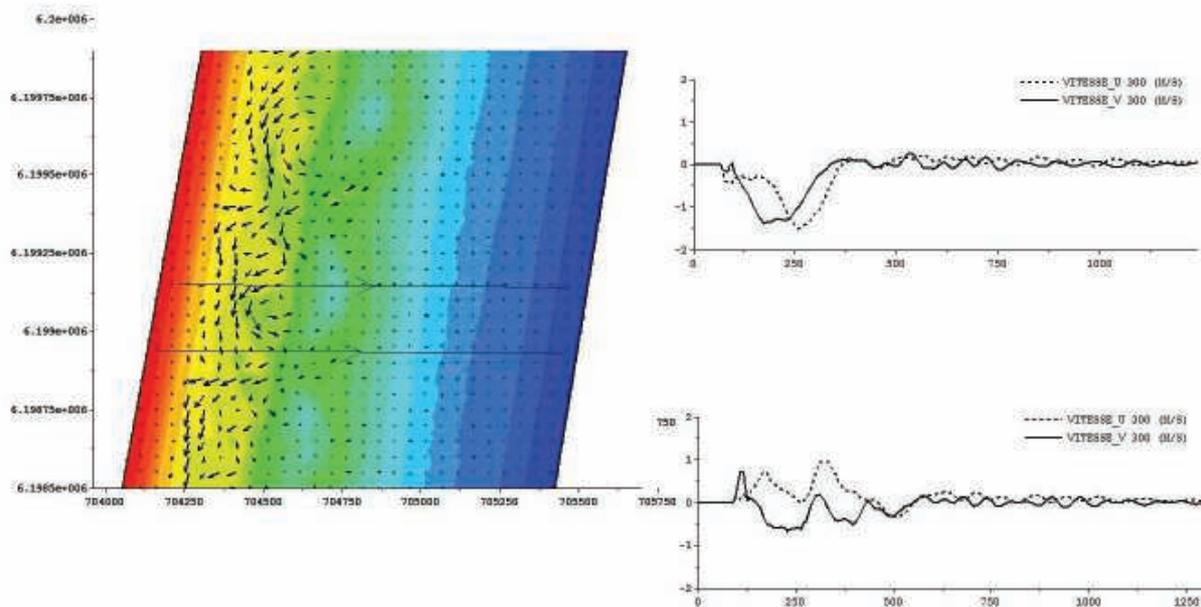


Fig. B.90: Bathy 07_2007, Incidence E-NE, TT12T Hs = 1,5 m, Tp = 12 s, Champ de vitesses

Une fois cette validation courantologique obtenue, plusieurs simulations ont ensuite été réalisées à partir de données bathymétriques obtenues en 2007.

Tout d'abord, une situation de TE avec incidence frontale permet de visualiser les modifications morphologiques induites par la houle sur deux profils distincts (Fig. B.91) et les courants générés (Fig. B.92) pendant 24 h. Des boucles de recirculation importantes apparaissent dans le système de barres internes, en n'induisant toutefois que des modifications morphologiques que sur un seul des deux profils représenté au niveau de la barre interne.

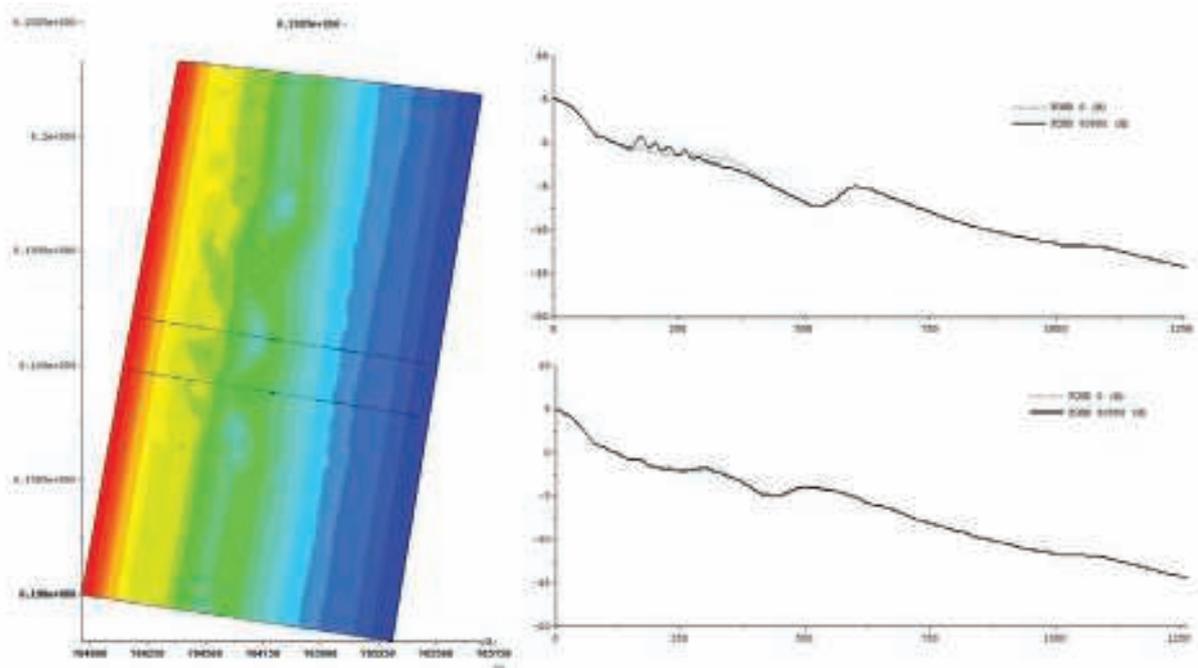


Fig. B.91: Bathy 07_2007, Incidence Nulle, TE Hs = 4 m, Tp = 10s, 24 h

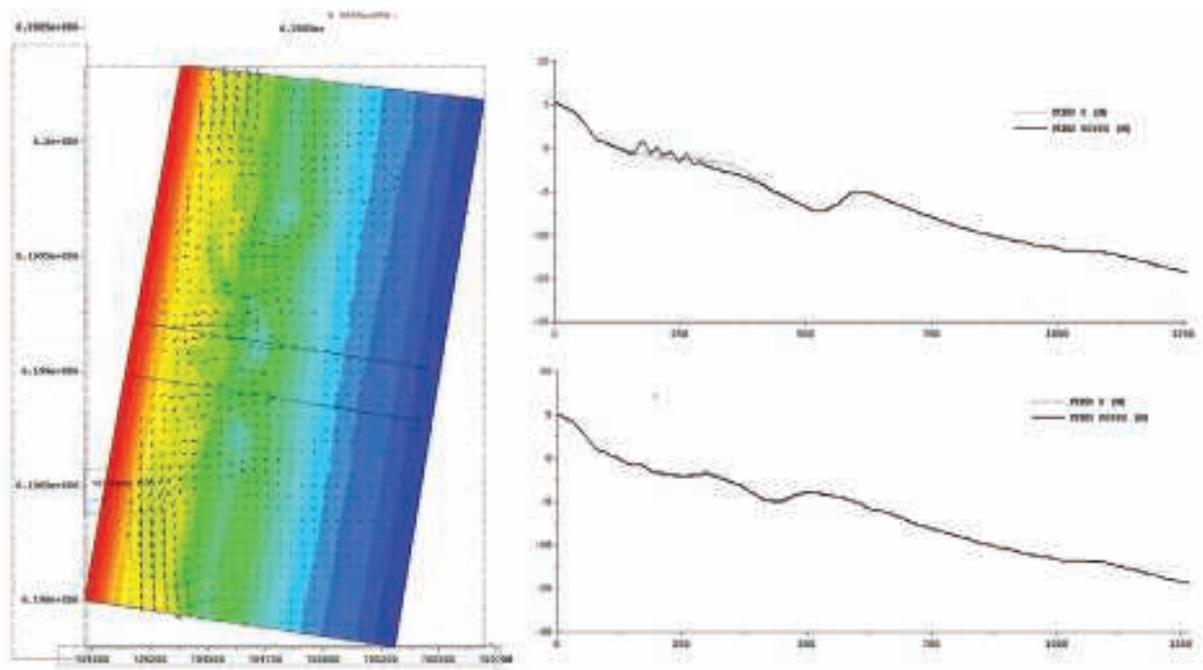


Fig. B.92: Bathy 07_2007, Incidence Nulle, TE Hs = 4 m, Tp = 10s, 24 h, Champ de vitesses

Ensuite, le même type de situation hydrodynamique TE est imposé avec une incidence oblique (Fig. B.93). Les barres internes subissent des modifications qui font plutôt dans le sens d'une migration vers la côte.

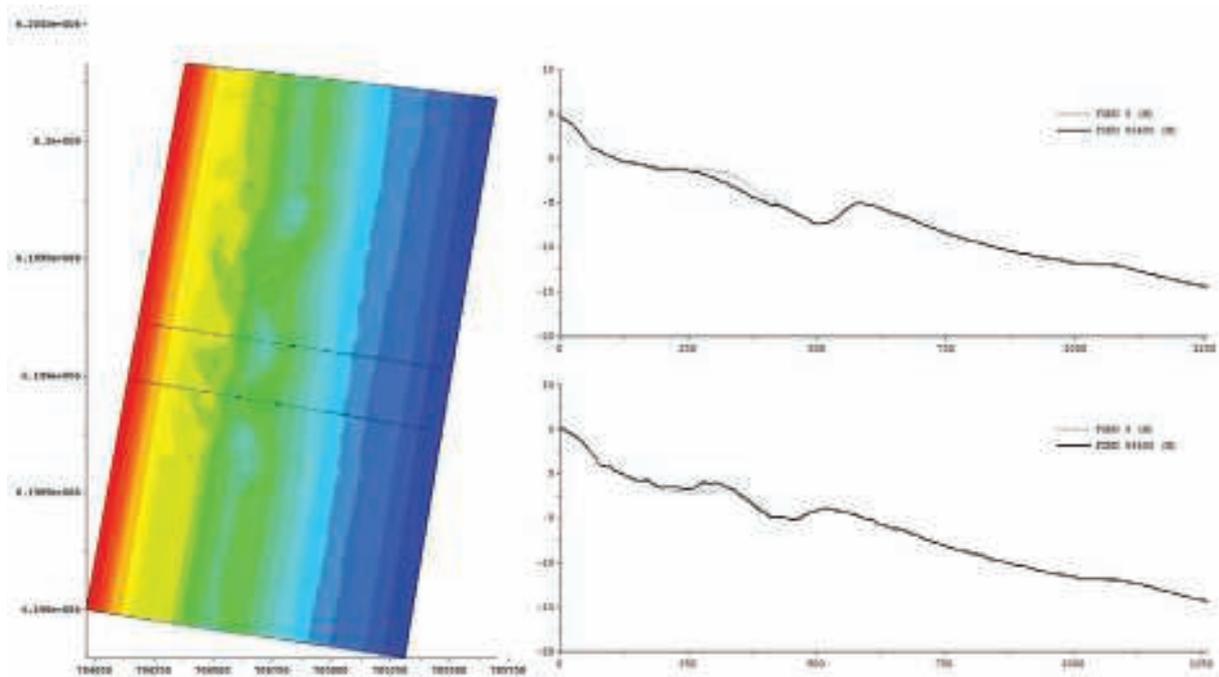


Fig. B.93: Bathy 07_2007, Incidence E-NE, TE Hs = 4 m, Tp = 10s, 24 h

Enfin, une situation de TC avec incidence frontale et incidence oblique est ensuite réalisée (Fig. B.94 et B.95). Les boucles de recirculation dans le cas de l'incidence oblique sont beaucoup plus marquées par la composante longitudinale mais cela ne semble pas induire pour autant des modifications morphologiques beaucoup plus importantes. Certaines parties de la crête de la barre interne peuvent être modifiées sans pour autant en changer profondément les caractéristiques. Le profil qui se situe au niveau du ventre de la barre externe, où la crête externe est la moins haute, est celui sur lequel les modifications sont les plus importantes.

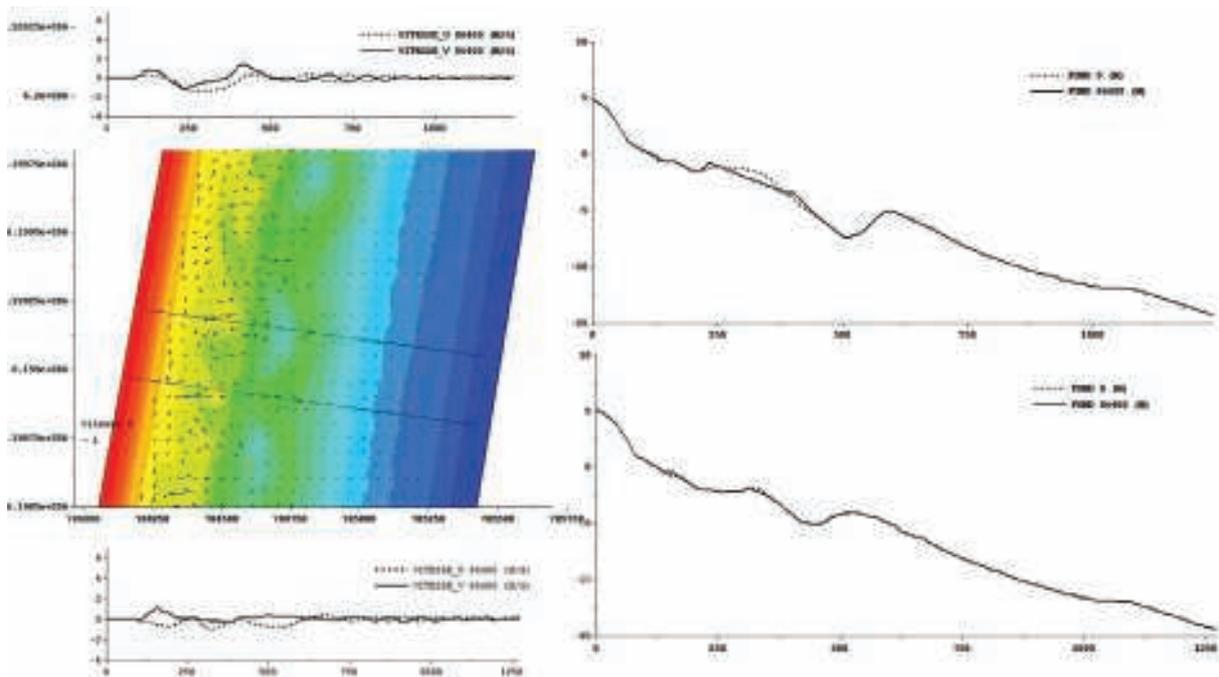


Fig. B.94: Bathy 07_2007, Incidence Nulle, TC Hs = 2,5 m, Tp = 7 s, 24 h, Champ de vitesses

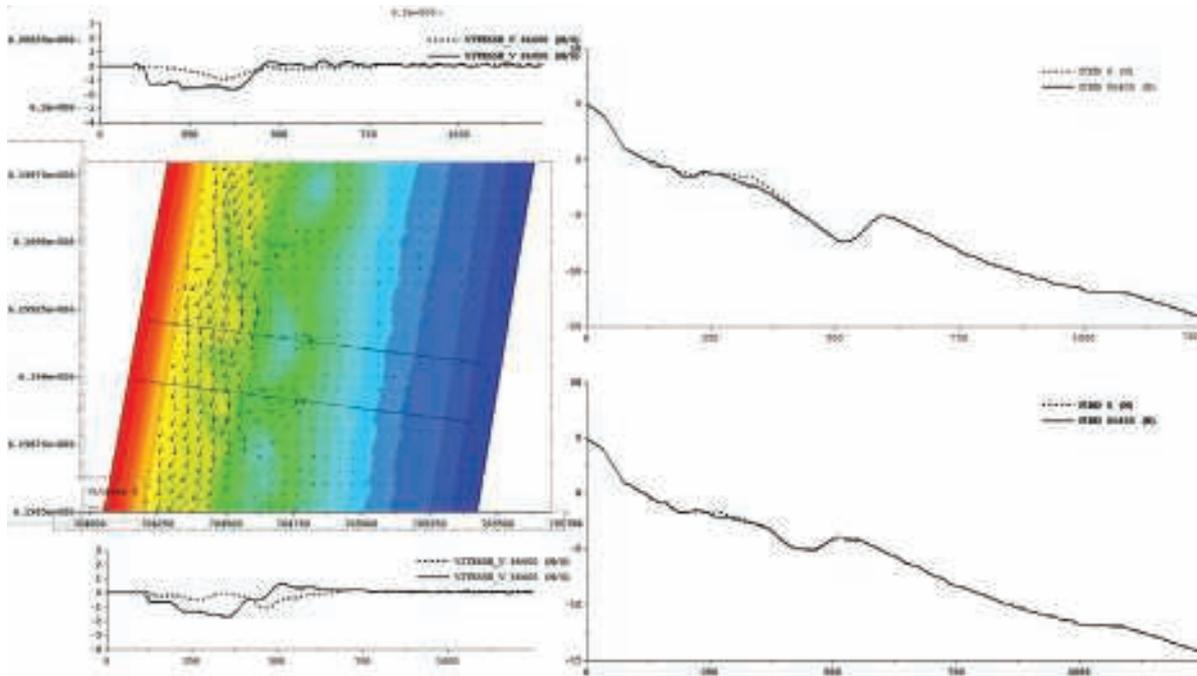


Fig.B.95: Bathy 07_2007, Incidence E-NE, TC Hs = 2,5 m, Tp = 7 s, 24 h, Champ de vitesses

B. 2.1.2. Simulations pour les données 2006

La simulation à partir de données bathymétriques de 2006 d'une TE avec incidence oblique confirme les observations réalisées pour 2007 : un fort courant de dérive longitudinale est créé en plus des boucles de circulation sur le système interne (Fig. B.97). Le système interne est le siège des modifications morphologiques sans pour autant qu'elles ne soient trop importantes (Fig. B.96).

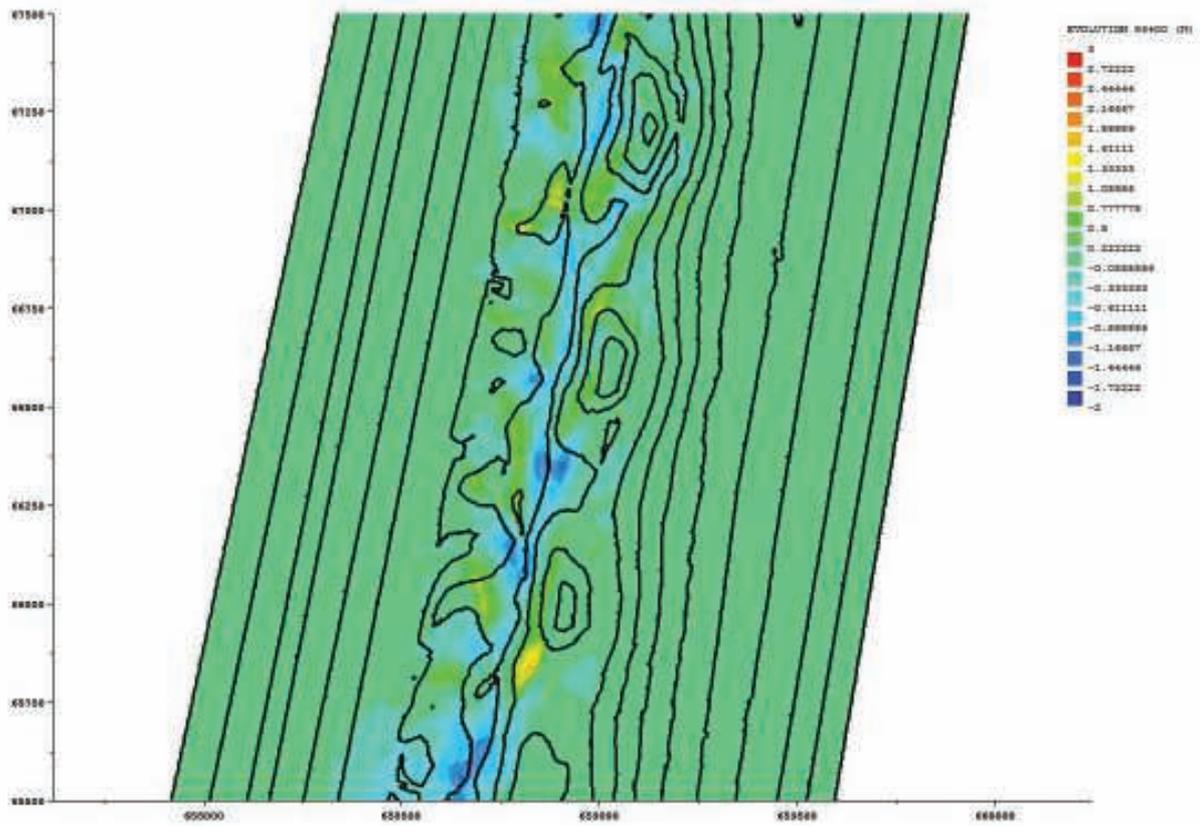


Fig. B.96: Bathy 04_2006, Incidence E-NE, TE Hs = 4 m, Tp = 10s, 24 h

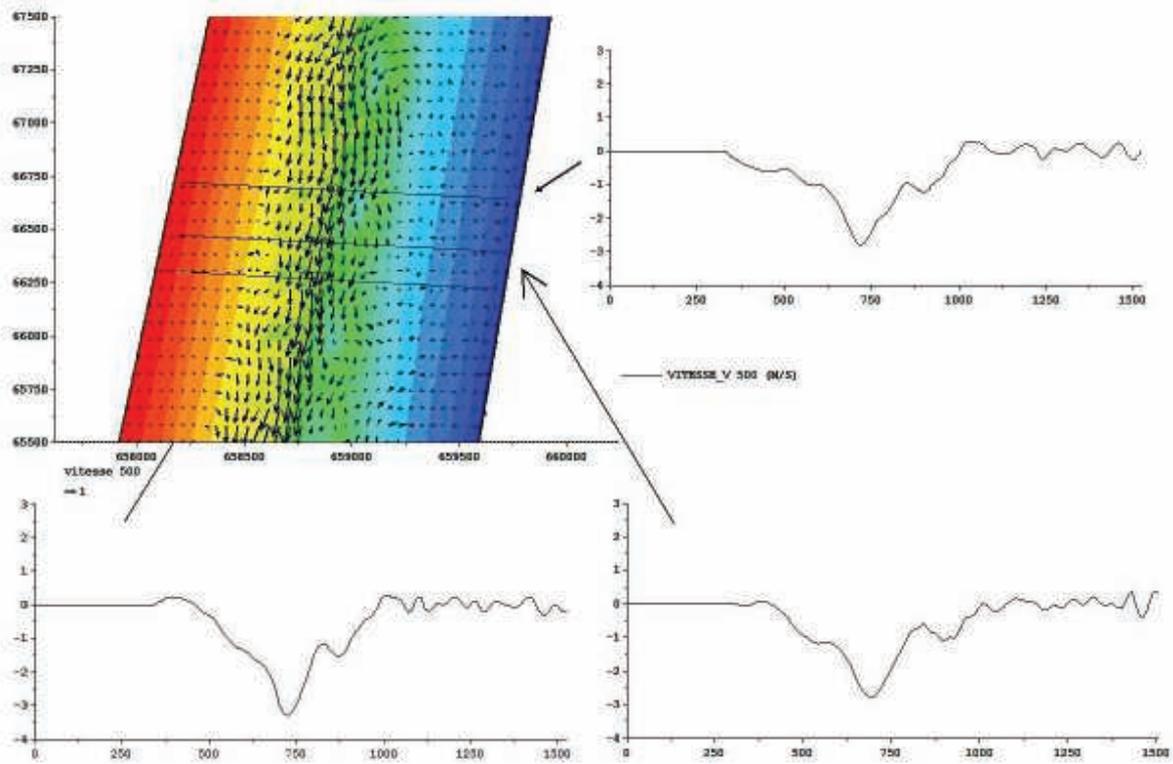


Fig.B.97: Bathy 04_2006, Incidence E-NE, TE Hs = 4 m, Tp = 10s, 24 h, Champ de vitesses

Conclusion pour les simulations à partir de cas naturels

L'ensemble des résultats obtenus semble cohérent et en concordance avec les observations de terrain. Même les tempêtes exceptionnelles n'engendrent pas de modifications sur le système externe et les modifications créées dans le système interne à l'échelle d'une tempête de 24h ne change pas radicalement l'état du système. Le système de barres de Leucate qui est décrit par le suivi réalisé comme remarquablement stable se voit confirmé par la modélisation numérique. Il faudrait dès lors enchaîner plusieurs tempêtes et créer des scénarios moyens terme pour voir apparaître des modifications significatives.

Le modèle est validé pour les conditions de faibles agitations, les vitesses de courant modélisées sont similaires à celles mesurées sur le terrain et les évolutions morphologiques simulées pour les situations plus énergétiques sont en concordance avec les évolutions morphologiques naturelles observées sur le site

B.2.2 Les cas de rechargements (sur la bathymétrie 2006)

B. 2.2.1 Simulation de cas de rechargements pour une incidente frontale

La simulation 2DH pour une incidence frontale montre que pour TE (Fig. B.98 et B.99) c'est dans le cas du rechargement sur la barre externe qu'il y a les plus faibles évolutions morphologiques, sans pour autant que les modifications engendrées avec un rechargement surnuméraire soient très importantes. On peut constater qu'en 2DH l'évolution des profils n'est pas aussi flagrante qu'avec le modèle transversal Multi-1DH Sisyphe et les changements sont surtout dûs aux recirculations de courant (Fig. B.100).

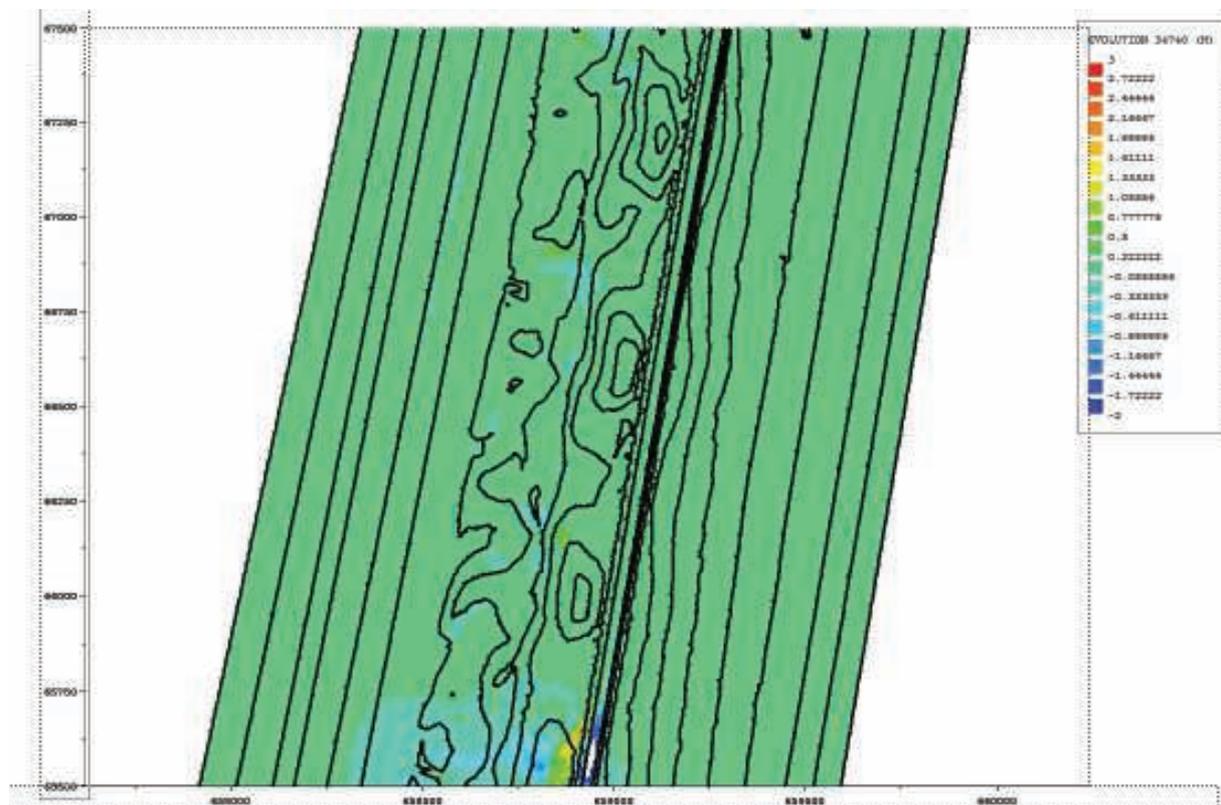


Fig. B.98: Bathy 04_2006, Incidence nulle (Theta = 0) TE Hs = 4 m, Tp = 10s, 24 h, Rechargement barre externe, évolution bathymétrique

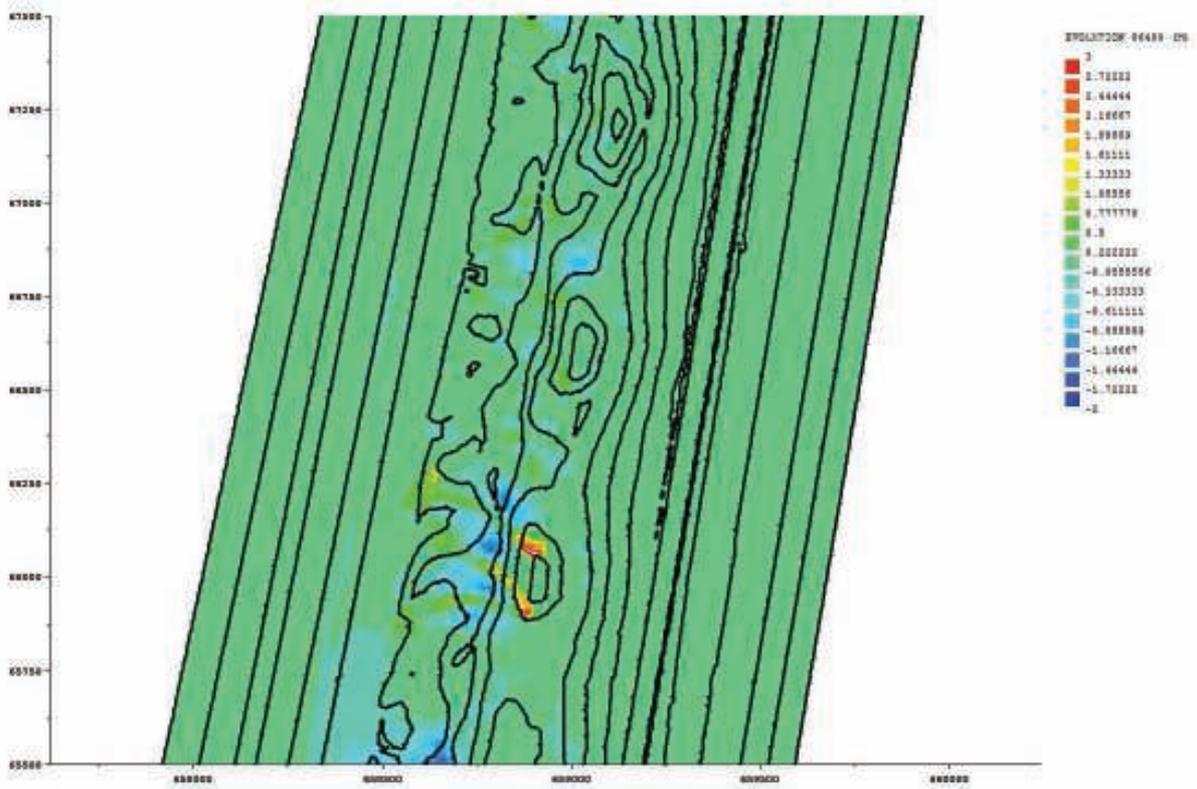


Fig.B.99: Bathy 04_2006, Incidence nulle (Theta = 0) TE Hs = 4 m, Tp = 10s, 24 h
Rechargement au large, évolution bathymétrique

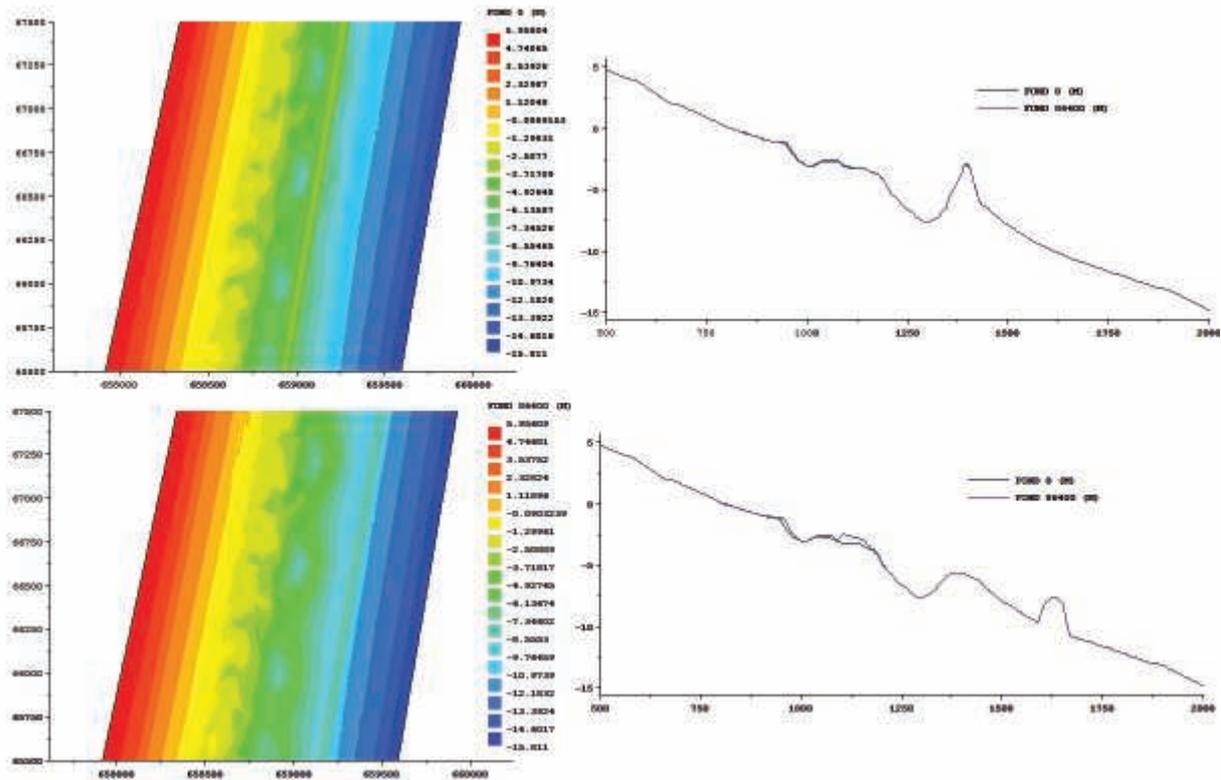


Fig.B.100 : Evolution du profil en 24h rechargement barre externe et création de la barre au large. Incidence nulle, TE.

B.2.2.2 Simulation de cas de rechargements pour une incidence oblique:

Nous allons comparer maintenant ces protections de plage pour un angle d'incidence E-NE.

Le calcul montre des grandes vitesses le long du rechargement de la barre externe rechargée provoquant une érosion de la partie supérieure du rechargement (fig. B.101 et B.102). En contrepartie les vitesses dans le système interne sont minorées (Fig. B.102).

Dans le cas du rechargement surnuméraire (Fig. B.103 et B.104), le rechargement n'est pas modifié mais les vitesses restent élevées dans le système interne.

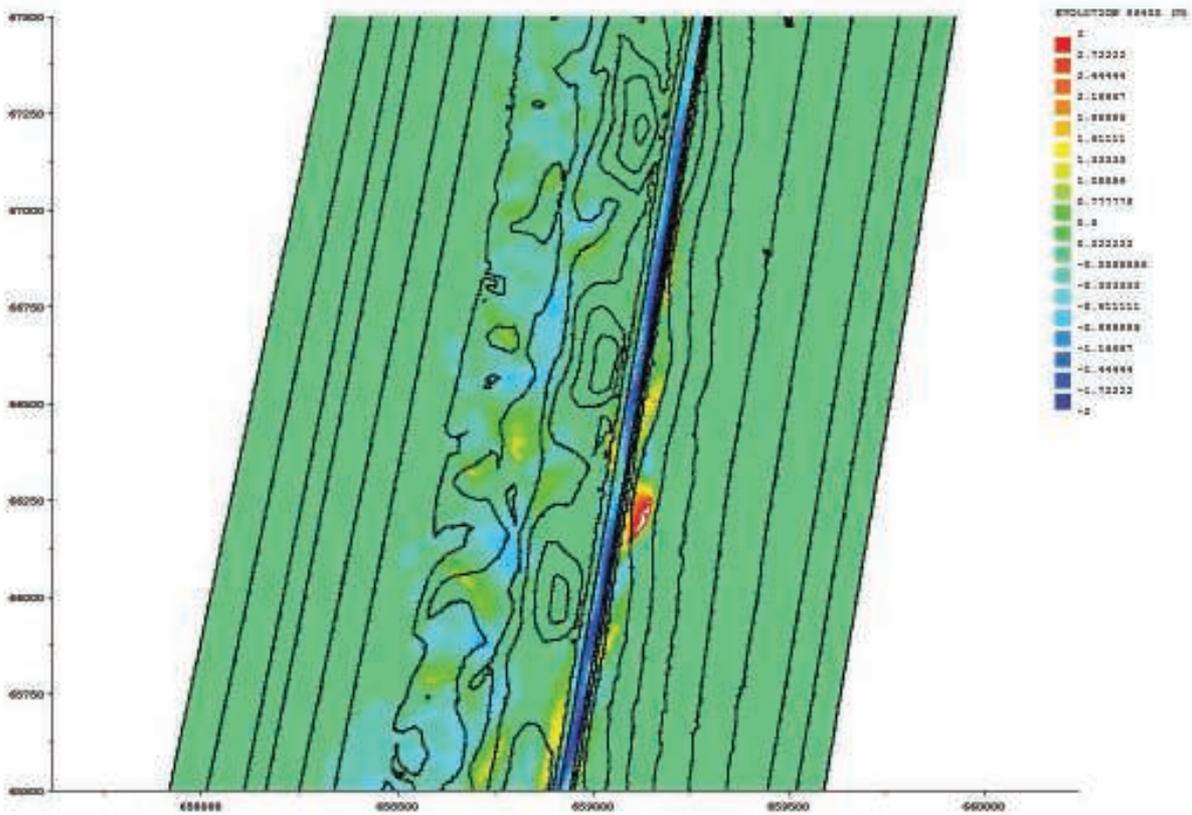


Fig. B.101: Bathy 04_2006, Incidence E-NE, TE Hs = 4 m, Tp = 10s, 24 h, Champ de vitesses, Rechargement barre externe

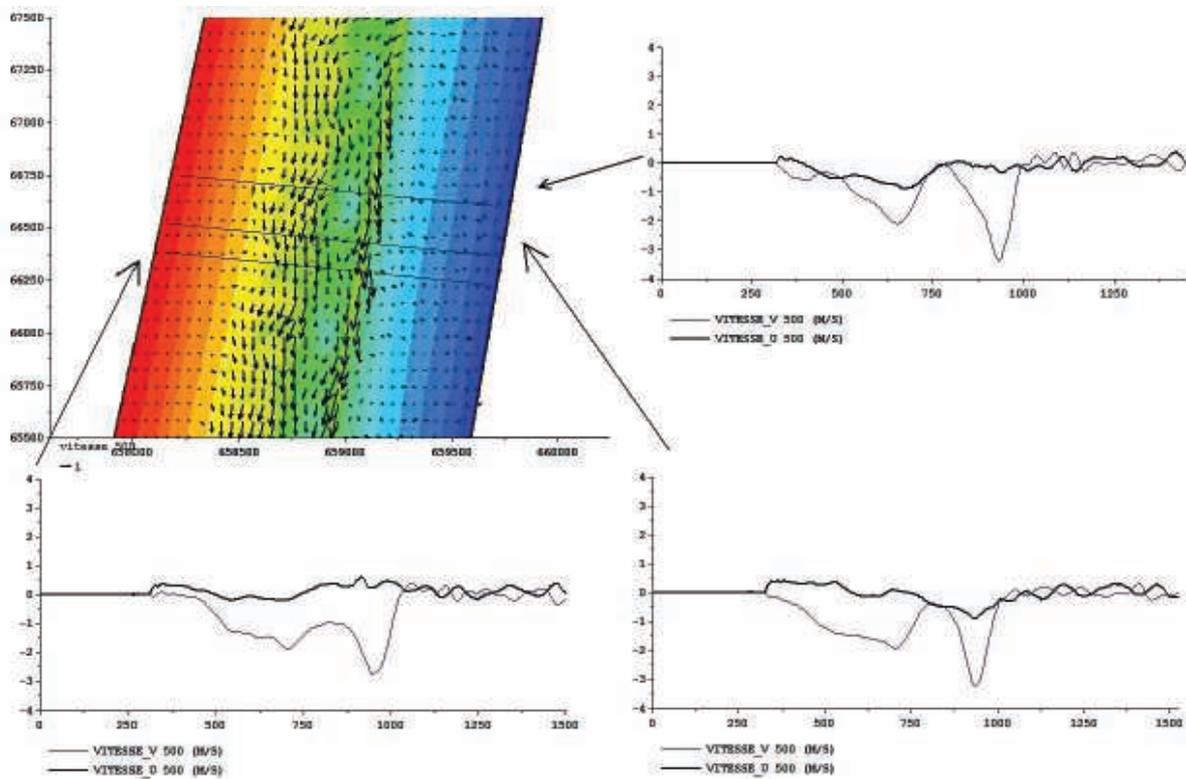


Fig. B102: Bathy 04_2006, Incidence E-NE, TE Hs = 4 m, Tp = 10s, 24 h, Champ de vitesses, Rechargement barre externe, champ de vitesses

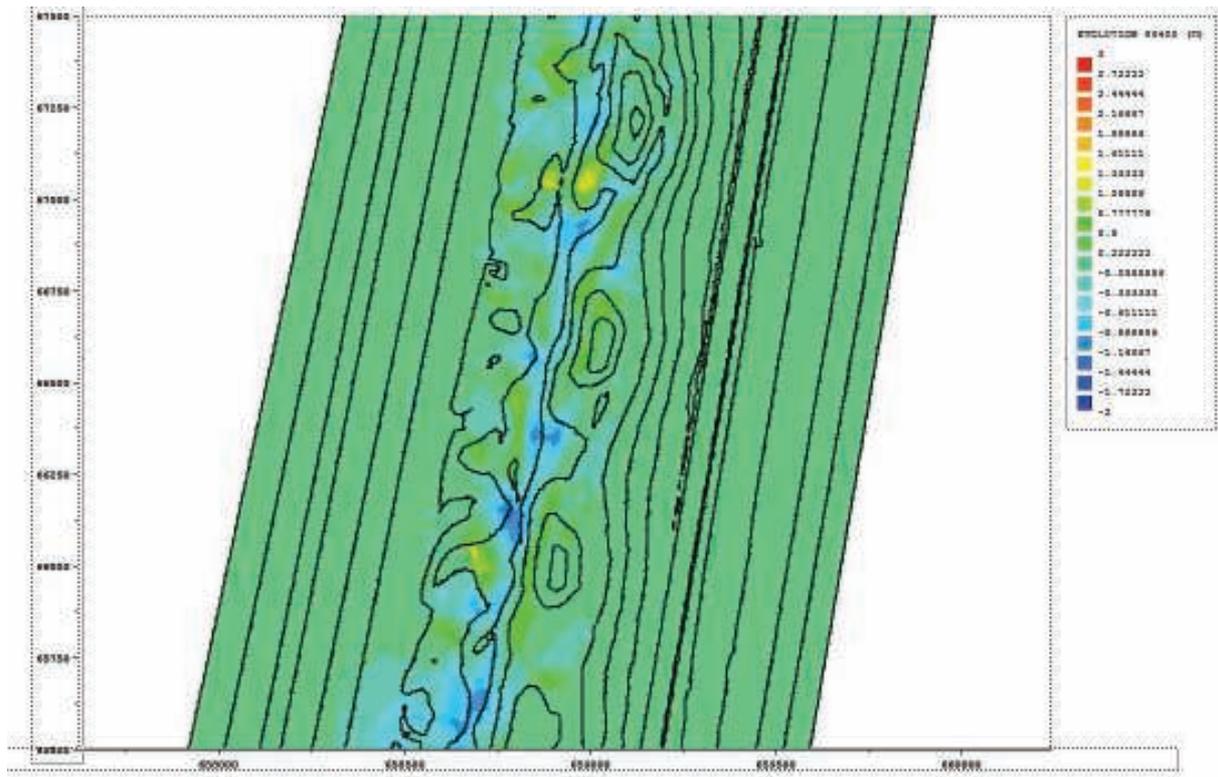


Fig. B.103: Bathy 04_2006, Incidence E-NE, TE Hs = 4 m, Tp = 10s, 24 h, Champ de vitesses Rechargement au large.

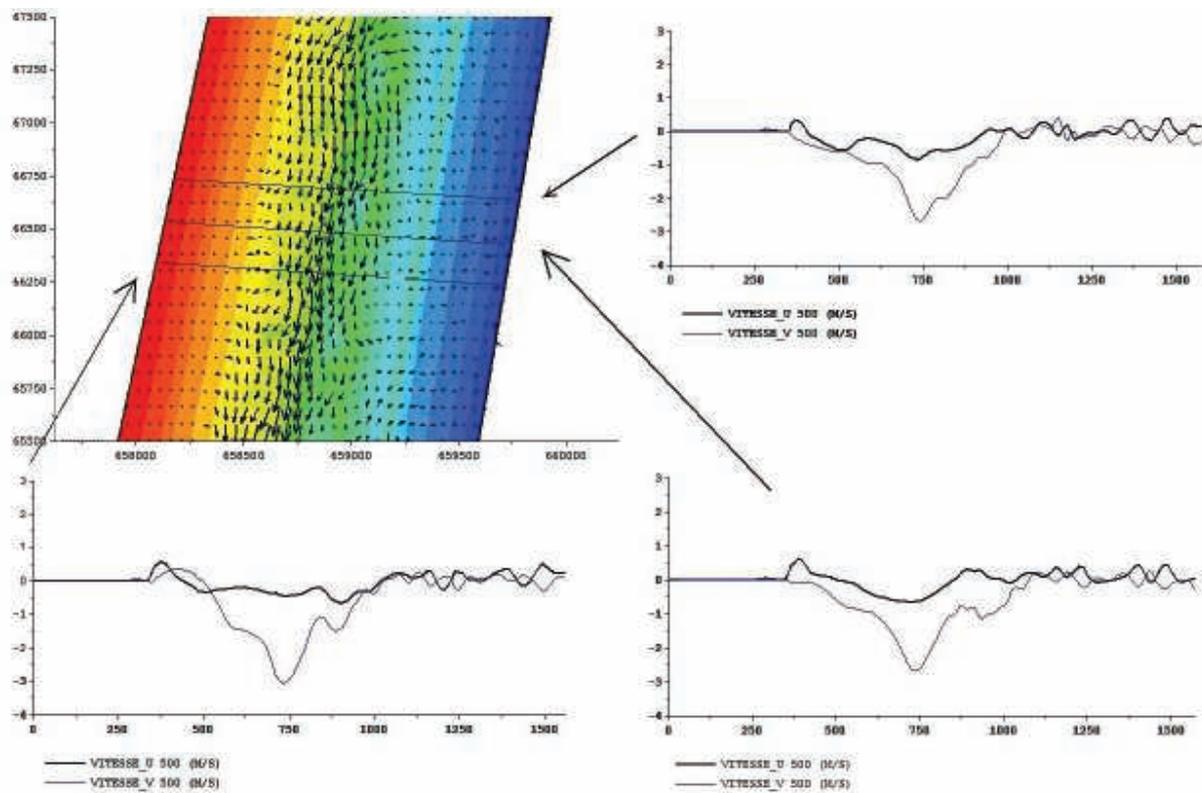


Fig.B.104: Bathy 04_2006, Incidence E-NE, TE Hs = 4 m, Tp = 10s, 24 h, Champ de vitesses, Rechargement au large, champ de vitesses

Conclusion pour les rechargements sur la plage de Leucate

Pour une houle frontale les évolutions du système interne ne sont pas importantes, même pour le rechargement surnuméraire, et le rechargement de barre externe paraît le plus approprié.

Pour une houle oblique, on observe une érosion du rechargement pour la barre externe mais ceci induit des diminutions importantes des vitesses de courants près de la côte. Le rechargement joue donc son rôle. Le rechargement surnuméraire est moins efficace.

Pour une houle frontale ou oblique les rechargements de barre externe apparaissent donc les mieux adaptés.

Synthèse des résultats obtenus pour les modèles Multi 1DH-Sisyphé et 2DH ATS:

Le modèle Multi 1DH-Sisyphé lorsqu'il est appliqué pendant des conditions de tempêtes de 24h démontre que pour la plage de Sète, les rechargements de barres externes et surnuméraires sont favorables, mais que le plus efficace reste le rechargement de barre externe. On est là en bonne concordance avec les observations faites avec le modèle 2DV Modhys. Pour Leucate, on n'observe pas beaucoup d'évolutions morphologiques pour des situations de TT et TC, comme pour Modhys, les plus grosses perturbations de l'avant-côte intervenant durant les TE sans pour autant que le sable rechargé soit perdu pour le système mais reste dans la zone des petits fonds. Il est difficile pour ce site d'établir une dominance d'un type de rechargement par rapport à un autre. On diffère ici des observations réalisées à l'aide de Modhys qui identifie les rechargements de barres externes comme les plus efficaces pour ce site, tout en montrant des évolutions morphologiques associées plus importantes. Si on étend le fonctionnement du modèle Multi 1DH-Sisyphé sur des durées de simulations plus longues, on note que l'impact de TE pendant trois jours est élevé mais que les rechargements permettent de maintenir le sédiment dans les petits fonds. Les situations de T pendant 10 à 20j ne montrent pas par contre de remontée de sédiment vers la côte comme cela a pu être démontré sur d'autres sites.

Le modèle 2DH ATS montre que seules les tempêtes exceptionnelles ont un effet important sur le système interne, comme cela est observé sur le terrain. Le modèle est donc validé. On observe cependant une tendance à minorer la prise en compte des déplacements transversaux. Plus les conditions d'incidence de la houle sont obliques, plus on observe de déplacements morphologiques, notamment des ondulations *longshore* comme cela est observé sur le terrain. Cependant des incertitudes demeurent sur les vitesses des courants *longshore* au bord de l'ordre de 2,5 à 3 m/s dans le modèle et l'absence de mesures in situ.

Les rechargements surnuméraires sont de plus en plus efficaces si on les rapproche de la barre externe, mais peuvent être érodés en position de barre externe pour TE.

Le rôle essentiel des rechargements surnuméraires se situe pendant les tempêtes exceptionnelles, ils ont peu d'impact lors de conditions moins dynamiques.

Les rechargements de barre externe demeurent la meilleure défense pour la plage même si la morphologie rechargée peut subir des modifications de forme importantes pendant les TE.

Les résultats obtenus sur l'efficacité des rechargements d'avant-côte à l'aide du modèle 2DH sont en concordance avec ce qui a pu être décrit pour les modèles transversaux.

Conclusion générale pour les modèles numériques

1. Pour des situations de tempêtes exceptionnelles, le fait de créer une troisième barre surnuméraire au large peut être efficace mais il faut que cette barre soit suffisamment volumineuse ou assez près du bord/ en position bathymétrique suffisamment haute sur le profil pour créer un déferlement de la houle. Cette information est importante pour les futurs cas d'application et il faudra en tenir compte dans le dimensionnement des morphologies créées qui devront être massives. Les situations de tempêtes exceptionnelles confirment cette interprétation.
2. Le rechargement directement sur les barres externes est la méthodologie qui semble la plus efficace pour diminuer l'action de la houle à la côte lors d'une tempête mais l'énergie reste importante dans le système interne, ce qui amène à penser que cette solution puissent être accompagnée aussi par du rechargement de plage.
3. Le scénario retenu au départ de simulation de fortes tempêtes définies par une Hs constante sur 24h induit une exagération des réponses observées et une minoration des effets des rechargements d'avant-côte. En effet, c'est uniquement lors de la phase de tombant successive à la tempête (non simulées ici) que les phases d'accrétion surviennent.
4. La réponse des différents profils testés n'est pas uniforme et dépend des conditions morphologiques intrinsèques du site. Ceci implique que toute généralisation des conclusions est difficile et que chaque nouveau site doit être considéré comme un nouveau cas et faire l'objet d'une étude spécifique. Dans cette étude, il semble que Sète soit le site qui se prête le mieux à cet exercice.
5. L'utilisation de modèles 2DH qui prennent en compte les effets longitudinaux semble nécessaire, surtout pour les sites soumis à des incidences obliques.
6. On observe des difficultés à modéliser l'évolution de la plage émergée.

Travail à poursuivre dans de futurs programmes et perspectives

Pour faire suite à ce travail, un certain nombre de points sont à améliorer ou à poursuivre dans le futur :

- Continuer de réaliser des simulations sur le plus long terme avec des situations météorologiques simplifiées mais représentatives afin de se rapprocher des conditions *in situ*. Les premiers résultats obtenus dans ce programme montre que le modèle utilisé par le LEGI a les capacités pour réaliser ces temps de simulations plus complexes.
- Préférer l'utilisation de modèles casi-3D
- Utiliser les modèles numériques afin de simuler les évolutions observées en canal à sédiment. Cette opération permettrait à la fois de mieux comprendre les limites des modèles et les améliorations à apporter, et en retour d'avoir un diagnostic sur la validité de la réduction d'échelle réalisée pour le canal.

Tâche C : Mise au point d'une l'interface de modélisation (IMFT)

Le modèle morphodynamique MODHYS, développé par l'IMFT et utilisé dans le programme antérieur de LITEAU I était un code à vocation recherche. Afin d'assurer sa pérennité et de rendre son utilisation possible par des utilisateurs (par exemple des gestionnaires) qui pour avoir une bonne connaissance des problèmes de la modélisation hydro-sédimentaires ne sont pas des développeurs d'outils, une « industrialisation » du modèle a été réalisée.

1. L'ensemble des fichiers constituant la distribution du code a été intégré dans le logiciel de gestion des versions CVS. Ainsi, la gestion de l'ensemble des évolutions du modèle, qui concernent tout ou partie des fichiers est archivée et des versions de références peuvent être reconstruites. Un utilisateur peut télécharger l'ensemble de la distribution depuis le serveur CVS de l'IMFT sur demande. La distribution a été structurée suivant le modèle présenté Fig. C.1.

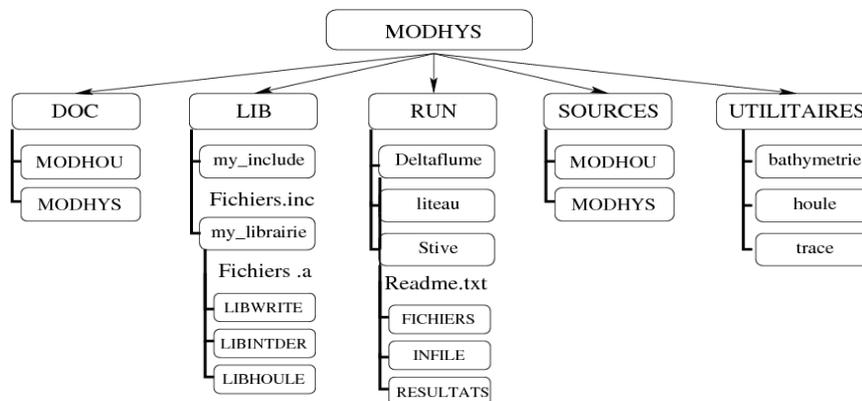


Fig. C.1 : Structure de la distribution du modèle morphodynamique MODHYS

2. Le code a été « nettoyé ». Tous les commentaires et parties de codes inutiles ont été éliminés. Chacun des sous-programmes a été disposé dans un fichier distinct puis commenté selon le modèle utilisé par la base CVS en précisant en particulier sa fonction et les sous-programmes appelants et appelés.
3. Des manuels d'utilisation ont été rédigés (un pour le modèle morphodynamique complet MODHYS et l'autre pour le modèle de propagation de houles MODHOU). Ces manuels comprennent une description des fonctionnalités des modèles, ainsi que la descriptions du mode opératoire pour les utiliser. Ces manuels sont fournis en annexe.
4. Un jeu de cas-tests a été mis en place et documenté pour permettre la vérification de la bonne fonctionnalité du code. Ces données correspondent aux cas utilisés pour la validation du code (Spielmann, 2002, Spielmann et coll., 2004) Ces cas-test permettent de tester les diverses options proposées par le code.
5. Un jeu de programmes utiles pour le pré- et le post-procédure sont également fournis dans la distribution. Ces programmes permettent d'une part de créer les fichiers d'entrée du code (bathymétrie, houles) et d'autre part, de tracer des figures présentant les résultats. Ce sont essentiellement des programmes développés sous Matlab.

Tâche D : Modélisation physique en canal (LEGI/IMAGES): tests de scénarios de rechargement dans des conditions de similitude avec le milieu naturel.

Préambule :

Ce travail a pu être mené à bien à la fois dans le programme LITEAUIII mais aussi grâce au soutien du programme Interreg IIIC Beachmed-e GESA, porté par le CG34 qui est par ailleurs partenaire du projet LITEAU II, qui a pu apporter un co-financement qui a permis de multiplier les expériences. Par ailleurs, dans LITEAU II une étude spécifique de l'évolution de la granulométrie le long du profil transversal pour les différents cas de rechargement étudiés a été réalisée.

Dans un souci de clarté, le présent rapport synthétise l'ensemble des expériences réalisées qui permettent d'avoir une vision d'ensemble du potentiel d'un modèle physique dans le diagnostic sur le rechargement de plage.

D.1 Stratégie de recherche

Pour prévoir la dynamique du rechargement on peut s'appuyer sur des modèles numériques comme cela a été expliqué plus haut. Cependant, si les scénarios d'érosion sont assez bien reproduits, les phases où le transport de sédiment s'effectue en direction de la côte sont en général très mal « capturées ». Il est donc intéressant de coupler approche par modèle numérique et physique.

Dans l'optique d'évaluer les stratégies de rechargement sous-marin il est nécessaire de mieux reproduire et comprendre la morphodynamique transitoire, particulièrement en terme d'évolution liée à l'accrétion. En effet, les conditions d'érosion de la partie haute des plages ont été bien analysées, documentées et modélisées dès les années 80 (Kriebel & Dean, 1985 ; Gunaydin & Kabdasli, 2003). En revanche la migration de sable, y compris associée à celle de barres vers le trait de cote, est souvent observée mais mal modélisée (Hoefel & Elgar, 2003). De plus, la description quantitative des profils d'équilibre reste très empirique même si des tentatives de modélisation sont proposées par quelques auteurs (Plant et al., 2001 ; Ribas, 2004).

Pour toutes ces raisons, les études expérimentales sur modèle réduit 2D sont une alternative précieuse et peu employée (Dette et al., 2002). Le Laboratoire des Ecoulements Géophysiques et Industriels (LEGI) a développé depuis quelques années une modélisation physique tournée vers la dynamique transversale dans le canal de 36m équipé d'un batteur générant une houle irrégulière (Hasselmann et al., 1993 ; Dean & Dalrymple, 1984). Nos actions de recherche porteront sur la compréhension de la dynamique des plages sableuses en environnement microtidal de type méditerranéen, des phénomènes hydrodynamiques responsables de cette dynamique et des tests en canal de laboratoire de scénarios schématisés de rechargement. Les expériences de laboratoires doivent être à même de reproduire tous les phénomènes qui concourent à ces dynamiques, à condition de respecter les similitudes concernant l'hydrodynamique et concernant le transport de sédiment.

Ce travail passe 1) par la définition de conditions expérimentales qui permettent 2) d'observer dans un premier temps l'influence de différents climats de houles sur un fond arbitraire, 3) de contrôler la formation ou non et la migration de barres sédimentaires, ainsi que (4) la bonne similitude de ces tests avec les observations faites en milieu naturel, (5) d'obtenir un profil d'équilibre dont la forme est proche d'observations faites sur le terrain, (6) de réaliser un rechargement sur ce profil stable et d'étudier son devenir.

D.2 Conditions expérimentales

Les expériences ont été réalisées dans le canal à houle de 36 m de long du LEGI, pour une hauteur d'eau de 55,3 cm. La grande originalité des expériences réside dans l'utilisation d'un sédiment mobile non cohésif de faible densité (PMMA, $\rho_s = 1,19 \text{ g.cm}^{-3}$), de diamètre médian $d_{50} \approx 0,6 \text{ mm}$ (vitesse de chute $W_s = 1,95 \text{ cm/s}$). L'échelle géométrique étant de l'ordre de 1/9 par rapport aux plages naturelles (la similitude de Froude implique une échelle de temps d'environ 1/3), ce choix de sédiment permet de respecter la similitude du transport sédimentaire (nombres de Shields et de Rouse en particulier). Des houles irrégulières (spectre de JONSWAP) respectant une distribution de Rayleigh se propagent et déferlent sur la plage de sédiments.

D.3 Evolution d'un fond arbitraire pour différents climats de houle

Nous avons étudié l'influence de différents climats de houle sur la bathymétrie, afin de caractériser le type d'évolution de la plage. Pour cela, plusieurs climats de houle ont été appliqués. Les houles différaient principalement par leur hauteur significative H_s (mm) et leur fréquence pic f_p (Hz). Le Tableau D.1 présente une synthèse de l'ensemble des climats de houle générés. L'évolution de la bathymétrie peut être définie par des phases d'érosion ou d'accrétion, et on cherche à comprendre le type de modifications et leurs localisations dans le canal pour des simulations allant de la faible houle estivale à la tempête.

Durée (h)	Nom	T_p (s)	H_s (mm)	Equivalence
0-47	vag2s107mm	2	107	Temps moyen
47-54	vag3s160mm	3	160	Petite tempête
54-63	vag2s030mm	2	30	Très petit temps (houle estivale)
63-74	vag2s107mm	2	107	Temps moyen
74-75	vag4s060mm	4	60	Petit temps
75-85	vag2s030mm	2	30	Très petit temps (houle estivale)
85-89	vag2s060mm	2	60	Petit temps
89-150	vag2s107mm	2	107	Temps moyen
150				Rechargement de plage
150-187	vag2s107mm	2	107	Temps moyen

Tableau D1 : Récapitulatif des climats de houle générés

Partant d'un profil arbitraire, nous avons appliqué le climat de houle moyen « vag2s107mm » pendant 47 heures (Fig. D1). Nous avons constaté une érosion de la berme et une accrétion du bas de plage sous-marine, la bathymétrie a pris la forme d'un profil de type « terrasse » (pente, plateau, pente), c'est-à-dire une barre peu marquée. La génération d'une petite tempête « vag3s160mm » durant 7 heures a engendré une évolution très rapide de la bathymétrie, renforçant fortement l'érosion du haut de plage et l'accrétion de sédiment vers le batteur. Le profil « terrasse » est descendu et s'est décalé vers le large.

Après avoir simulé un très petit temps « vag2s030mm », on a pu noter que ce type de houle n'influait que la morphologie de la partie supérieure de la plage. C'est-à-dire que la partie basse de la plage (0-19 m) n'était pas modifiée alors que le haut était légèrement remodelé avec la création d'une nouvelle berme plus proche du large (profils « vag3s160mm » et

« vag2s030mm » sur la Figure 39). Les modifications morphologiques ne sont pas très nettes et il est difficile de caractériser des zones d'érosion ou d'accrétion. D'autres climats de houle de faible amplitude ($H_s=30-60$ mm) dont la période pic variait entre $T_p=2-4$ s, ont été testés. Malgré les faibles modifications de plage, on a pu dégager une tendance générale à éroder le haut de plage au profit du milieu du profil.

Finalement, « vag2s107mm » (89-150 h) est le régime de vagues le plus morphogène.

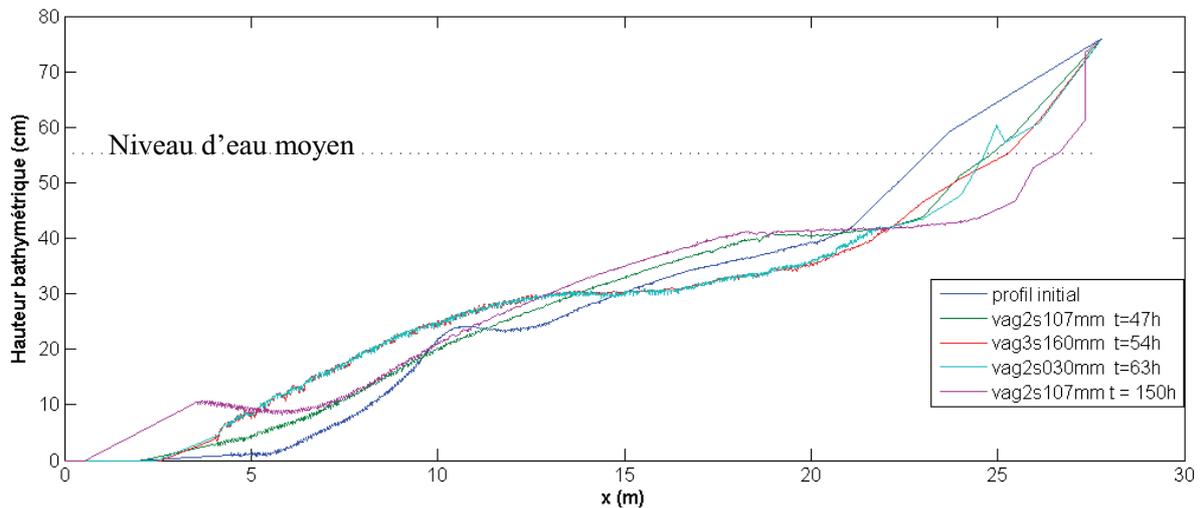


Fig. D.1 : Tracé des profils de fond à la suite de différents climats de houle.

D.4 Les états transitoires et la migration des barres créées

Au cours de nos expérimentations, la formation de barres semble limitée aux états transitoires. Ces phases transitoires correspondent généralement à des évolutions rapides du fond. Elles sont aussi souvent caractérisées par la migration de « barre », on voit sur la Figure D.2 qu'une partie de la plage prend la structure d'une dune et se propage vers le nouvel état d'équilibre. Sa vitesse de migration peut atteindre environ 1 m/h.; si l'on change le climat de houle avant d'avoir atteint l'équilibre (c'est –à-dire avant que la barre soit venue s'accoler à la plage), la barre peut rester en place. C'est ce qui peut être observé après une tempête, le temps qui suit est plus calme et modifie peu le profil de barre.

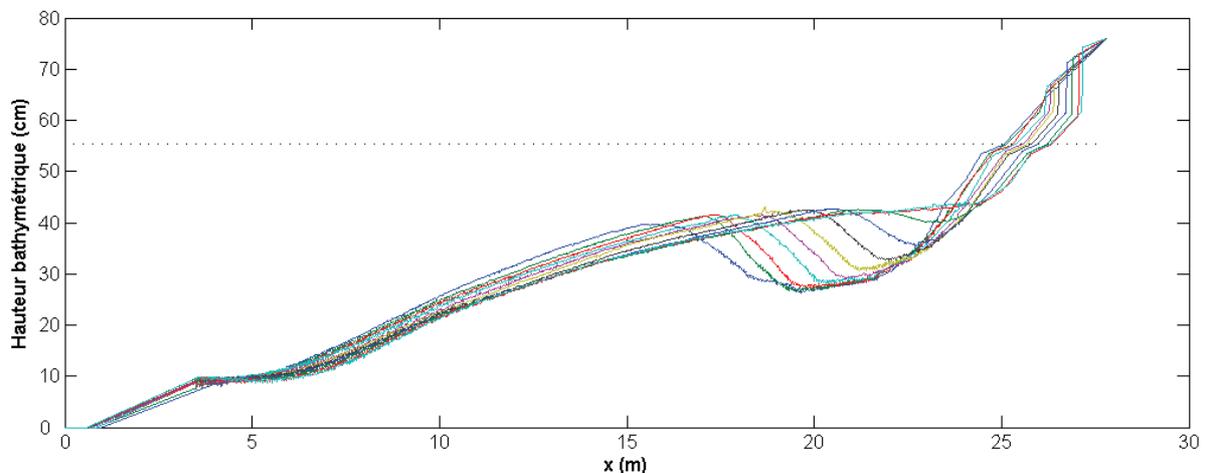


Fig. D.2 : Migration d'une barre : profils transitoires (environ un profil par heure)

D.5 Similitude morphodynamique canal /terrain

Nous avons comparé les bathymétries issues des expériences avec celles des plages réelles de Sète pour lesquelles les nombres de Rouse et Shields sont similaires. On retrouve le même type de structure en terme de bathymétrie et les pentes moyennes sont comparables ($\sim 2,5\%$ dans le canal et $\sim 2\%$ en réalité). Le temps moyen généré « vag2s107mm » correspond à un climat de houle de type « tombant de tempête » ($T_p = 6,5$ s et $H_s = 1$ m) vérifiant le rapport $1/3$ sur le temps et $1/9$ sur la hauteur imposé par la similitude de Froude. Il est également important de vérifier que la similitude est vérifiée en terme d'évolution, pour cela on compare les temps caractéristiques pour passer d'une bathymétrie à une autre. Malgré la faible discrétisation des données in situ, il semblerait que les profils de fond à Sète peuvent varier de l'ordre de 1,3 m en 8 jours. Cela équivaut à une vitesse d'évolution de ~ 2 mm/h en canal, c'est bien l'ordre de grandeur que nous observons au cours de nos expérimentations. Une tempête d'environ 24 h a été enregistrée le 17/01/1999 en Méditerranée, dans notre cas nous avons simulé ce type de houle pendant 7 h, la similitude en temps ($1/3$) est encore une fois cohérente. Nous avons également observé que les structures de fond créées dans le canal reproduisent des phénomènes réels (dunes, rides gaufrées, ...).

Il est donc intéressant de remarquer que la similitude morphodynamique (évolution des formes) semble respectée à condition de respecter les similitudes hydrodynamique (Froude) et de transport sédimentaire (Rouse et Shields).

D.6 L'obtention de profils d'équilibre

Cependant, pour mener à bien nos expérimentations, il faut essayer de se placer au départ dans une configuration relativement stable du profil comme on peut l'observer dans le milieu naturel. La difficulté de rechercher un état quasi-stationnaire (lorsque l'évolution de la bathymétrie devient très faible) est que cela nécessite un temps très long (plusieurs dizaines d'heures). Afin d'analyser plus précisément ce concept d'équilibre morphodynamique, un même climat de houle « vag2s107mm » a été appliqué sur des profils de fond différents (« 0-47h » et « 89-150h » sur la Fig. 49). Les bathymétries obtenues sont très semblables même si la houle n'a pas permis de reproduire exactement le même profil d'équilibre.

D.7 Cas de simulation de rechargement de plage

Deux séries d'expériences ont été faites, appelées **expérience n°1** et **expérience n°2**.

La première expérience avait pour but de mettre au point la méthode novatrice et de tester un cas simple, le rechargement du revers de la barre interne. La barre interne est alors la seule barre du profil, la barre externe est absente. Les conditions simulées correspondent à un profil de barre interne peu marquée en forme de terrasse comme cela peut être observé sur le terrain lors d'épisode de fin de dégénérescence de barres vers le large. Le forçage hydrodynamique imposé correspond en nature à des situations de faible houle, qui peuvent se rattacher à des situations de tombant de tempête. Les conclusions ont été encourageantes avec l'observation de l'engraissement de la plage pour les conditions imposées.

Il a donc été décidé de passer à une deuxième étape, **l'expérience 2**, en se plaçant dans des conditions de similitudes avec le milieu naturel meilleures (profil différent avec la création d'une barre externe plus large mais zone interne non barrée) et en travaillant la décomposition du signal de la tempête, en divisant le montant et le tombant de la tempête. Des tempêtes de

plus forte amplitude ont été par ailleurs imposées. 3 cas ont été testés qui s'avèrent tous prometteurs et permettent de mettre en évidence le rôle des rechargements et de la barre externe dans les processus de déferlement et d'engraissement de la plage. Le lien et la comparaison entre les deux expériences est rendu possible par la similitude d'un cas de rechargement commun dans la zone interne (même profondeur d'immersion du rechargement et même tranche d'eau au dessus du rechargement, le seul changement étant la distance de la barre à la côte). Une analyse spécifique de l'évolution de la granulométrie le long du profil transversal a par ailleurs été réalisée pour cette expérience 2.

*** L'EXPERIENCE 1**

Partant de l'obtention de profils d'équilibre, nous avons simulé un cas de rechargement d'avant-côte dans l'objectif de reconstituer une berme érodée ; pour cela nous avons prélevé du sable au large et l'avons déposé en avant de la zone de déferlement. Pour ce premier cas étudié, le choix a été fait de réaliser ce rechargement sur le revers de la barre interne (150 à 200 m du rivage) si on se replace dans le cas naturel à l'échelle (l'échelle horizontale de la figure D.3 est à multiplier par 10 pour obtenir la correspondance avec le milieu grandeur nature). Ce scénario n'avait jamais été testé auparavant notamment dans LITEAU I et cet éclairage semblait absolument nécessaire comme point de départ. Nous sommes partis du profil d'équilibre du climat de houle « vag2s107mm » (89-150h) (Fig. 49). Le résultat a été la formation d'une barre très raide qui a migré vers le haut de plage à une vitesse de 1 m/h, puis elle est venue se coller à la berme (« vag2s107mm », 150-187h).

On note que la quasi-totalité du sédiment rechargé est venu se placer en haut de plage. Comme le climat de houle a duré assez longtemps, la faiblesse des évolutions du fond justifie qu'on y reconnaisse un état d'équilibre. Le même profil d'équilibre a été atteint pour un climat de houle généré sur des profils initiaux différents. On peut donc parler de reproductibilité des profils d'équilibre.

Cela nous conforte dans l'idée que le rechargement de plage peut être une alternative efficace (la quasi-totalité du sédiment rechargé a été transportée vers la berme) et stable (état d'équilibre atteint) pour la reconstitution des bermes sous des conditions suffisamment longues (10j) de situation d'agitation moyenne de type tombant de tempête.

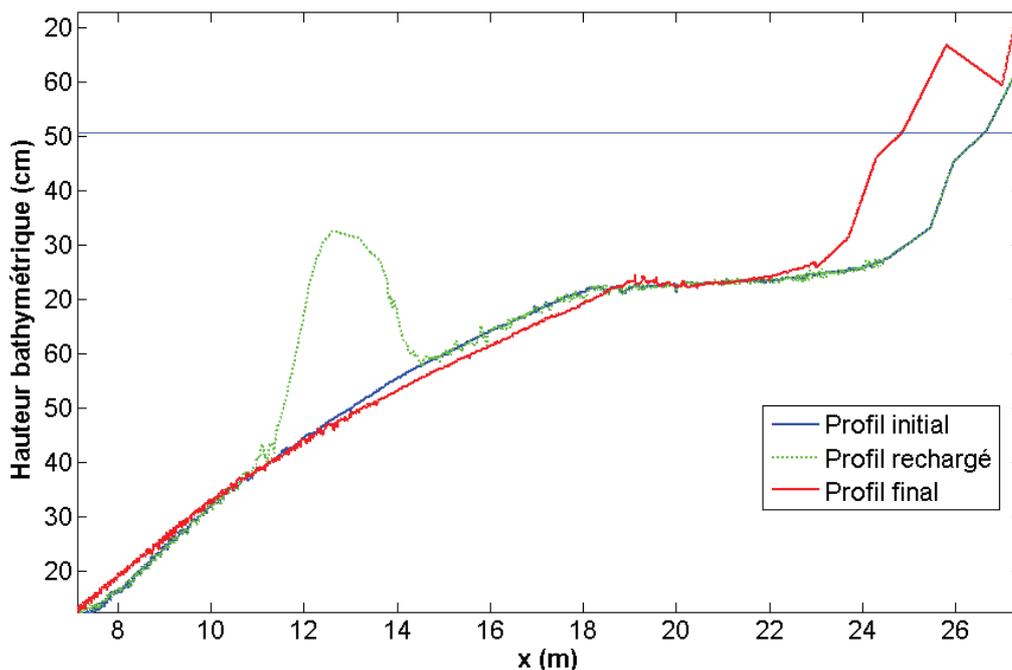


Fig. D.3 : Profils d'équilibre avant et après rechargement (houle : « vag2s107mm »)

Conclusions de l'expérience 1

Nous observons qu'un climat de houle influence la bathymétrie et fait tendre celle-ci vers un profil d'équilibre. La phase transitoire entre deux états d'équilibre correspond à des fortes variations du fond, elle peut être caractérisée par la migration d'une barre. Cependant un climat de houle très faible aura peu d'influence sur la bathymétrie en place et remaniera seulement le haut du profil.

Les résultats du cas de rechargement d'avant-côte sur le revers de la barre interne sous des conditions d'agitations moyenne suffisamment longues (10j) sont encourageants. La quasi-totalité du sédiment prélevé en pied de plage puis rechargé au large de la zone de déferlement est venu se coller à la berme et ainsi compenser son érosion. L'évolution de la bathymétrie s'est stabilisée pour atteindre un état d'équilibre. On note toutefois une lente accumulation de sédiments en pied de plage qui pourrait être expliquée par l'influence du batteur.

*** L'EXPERIENCE 2**

Trois cas sont abordés : avec rechargement 1) dans la fosse de la barre externe ; 2) sur la barre externe et 3) au niveau de la zone interne (Fig. 54). Les dimensions du canal n'ont pas permis de créer une barre surnuméraire au large de la barre externe.

Pour cette partie on ne reprendra pas les explications faites pour la partie méthodologie utilisée et la philosophie de l'opération, mais après une brève description des nouvelles conditions expérimentales on ira directement aux résultats. Le principal changement réside dans la façon de simuler les conditions d'agitation, en décomposant la tempête en une phase de montant et une phase de tombant. Cette partie importante pour la suite de la compréhension est détaillée ci dessous.

Par ailleurs, nous nous attacherons à **examiner l'influence des variations de granulométrie le long du profil** (en particulier en testant l'effet d'un rechargement d'avant-côte de matériel plus fin) et les relations entre les évolutions morphologiques/granulométriques et la transformation des vagues le long du canal. Cette partie est présentée en fin de cette partie.

Reproduction d'un scénario de tempête basé sur les observations de la plage de Sète :

Une série de rechargements d'avant-côte a été réalisée dans le but d'étudier l'influence de la position dans le profil du dépôt de sédiment sur son efficacité. Pour cela nous sommes partis d'un profil de fond à barre externe obtenu après la succession de tempêtes caractéristiques. Ces conditions de houle correspondent au type de tempêtes qu'il est possible d'observer régulièrement dans l'hiver sur la plage de Sète (Certain, 2004), jouant un rôle notoire sur l'évolution de la morphologie de la plage (Figs. D.4 et D.5). **Cette tempête a été découpée en deux épisodes : le montant de tempête**, correspondant à l'augmentation de la hauteur des vagues jusqu'à la fin du climat de houle le plus fort ; et **le tombant de tempête**, correspondant à la diminution de la hauteur des vagues jusqu'au climat de houle de type « estival ».

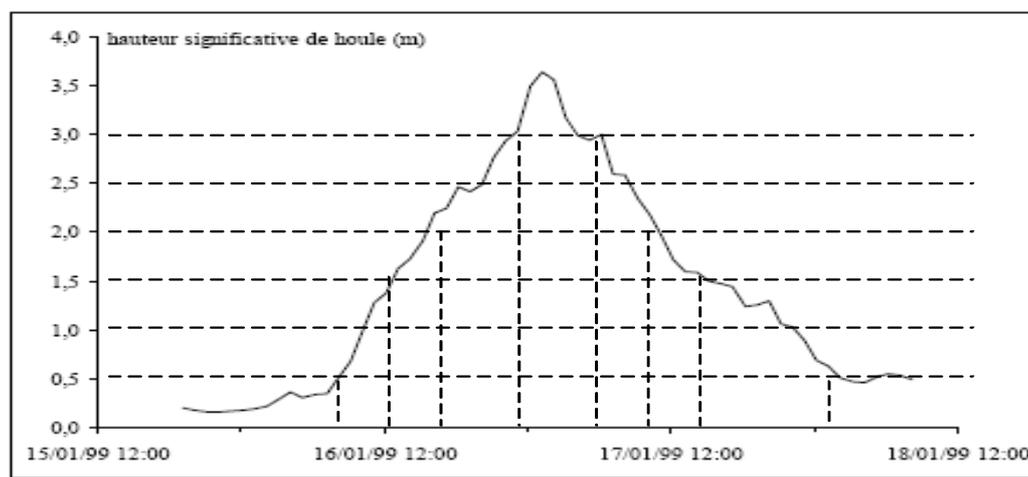


Fig. D4 : Tempête caractéristique du site de Sète (15-18 janvier 1999).

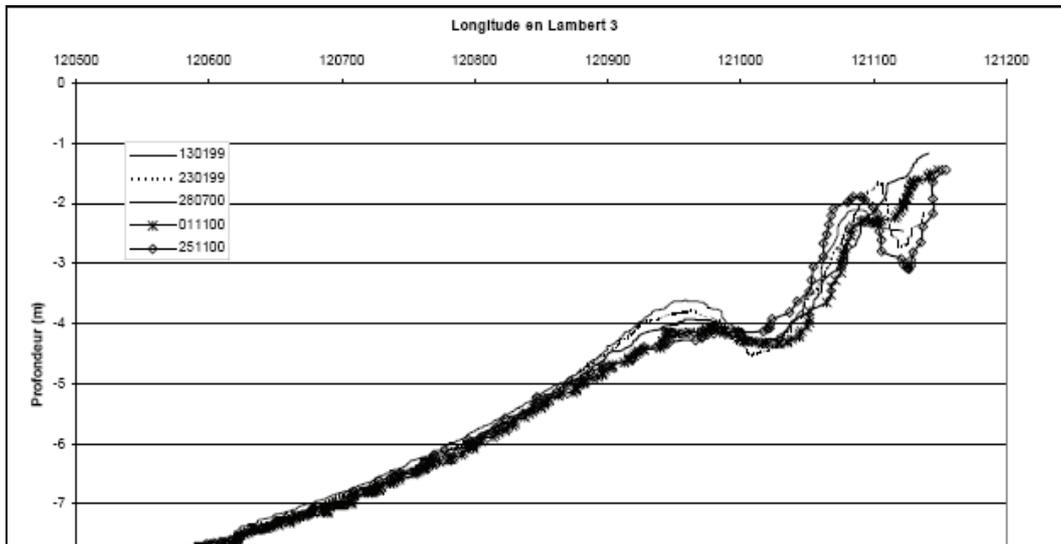


Fig. D.5 : Profils de fond correspondant à la tempête de Sète (15-18 janvier 1999).

Les climats de houle utilisés pour générer notre tempête expérimentale sont définis dans le Tableau D.2 par leur hauteur significative, leur période pic et leur durée. Nous travaillons avec une échelle réduite sur la longueur de l'ordre de $1/12$ impliquant une échelle réduite sur le temps d'environ $1/3.5$ (similitude de Froude). Le cycle de la tempête (montant + tombant) dure environ 10h30 ce qui représente approximativement 37h en nature. Nous ne reproduisons pas exactement la hauteur de houle observée en nature car nous sommes limités par les dimensions du canal expérimental.

MONTANT DE TEMPETE					
Canal expérimental			Equivalent nature		
Hs (mm)	Tp (s)	Durée (h)	Hs (m)	Tp (s)	Durée (h)
60	1.5	1	0.7	5.2	3.5
107	2	1	1.3	7	3.5
135	2.5	1	1.6	8.7	3.5
160	2.7	1	1.9	9.4	3.5
160	3	2.5	1.9	10.5	8.7

TOMBANT DE TEMPETE					
Canal expérimental			Equivalent nature		
Hs (mm)	Tp (s)	Durée (h)	Hs (m)	Tp (s)	Durée (h)
160	2.7	1	1.9	9.4	3.5
135	2.5	1	1.6	8.7	3.5
107	2	1	1.3	7	3.5
60	1.5	1	0.7	5.2	3.5

Tabl. D.2 : Décomposition d'une tempête caractéristique observée à Sète et générée pour la modélisation physique.

Cas de rechargement d'avant-côte :

Une première tempête a d'abord été générée sur un profil de fond non rechargé puis trois autres ont suivies, correspondant chacune à un cas de rechargement différent. Il est important de noter que les profils de fond initiaux avant chaque simulation de rechargement ne sont pas identiques. **En effet, le surplus de sédiment résultant du cas précédent ne peut pas être retiré du modèle et modifie donc les conditions initiales du rechargement suivant.** Ce point est à considérer pour l'analyse de l'efficacité de chaque cas.

Les rechargements représentant un volume de l'ordre de 0.16 m^3 (*équivalent à 500 m³ linéaires en nature*) ont été localisés : 1) dans la fosse de la barre externe ; 2) sur la barre externe et 3) au niveau de la barre interne (Fig. D.6). **Les dimensions du canal n'ont pas permis de créer une barre surnuméraire au large de la barre externe.**

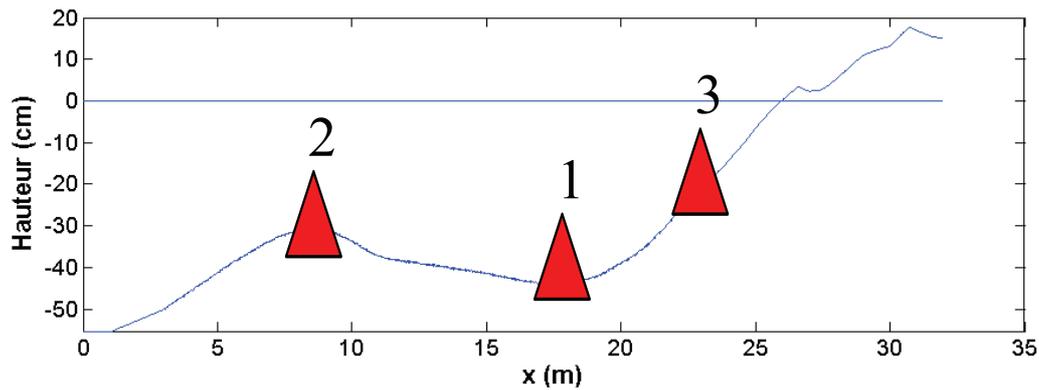


Fig. D6 : Cas de rechargement au niveau de la barre externe, de la fosse et la zone interne.

Analyse des effets des rechargements d'avant-côte :

Les différentes simulations sont représentées sur les Figs. D.7 à D.10 par les profils de fond (**initial en bleu pointillé, rechargé en turquoise plein, après le montant en rouge tireté et après le tombant en vert plein**) mais également par l'évolution de la hauteur des vagues (H_{rms} en rond rouge) le long du canal pour le climat de houle le plus fort ($H_s=160\text{mm}$, $T_p=3\text{s}$). Ces mesures de **vagues correspondant au profil de fin de montant de tempête (en rouge tireté)** sont les plus destructrices en terme de morphologie de haut de plage, il est donc intéressant de comparer leur énergie pour chaque cas. Le niveau de la surface libre au repos est tracé en bleu à l'ordonnée 0.

Cas de référence :

Nous observons sur la Figure D.7 l'effet d'une tempête sur un profil de fond à barre externe (bleu pointillé). A la fin du montant (rouge tireté) **la berme est érodée de 1.3m (15.6m nature), la barre externe est décalée vers le large de 5m (60m nature)** mais la pente de haut de plage reste peu changée. Ensuite, **le tombant (vert) va lisser le profil de fond et reconstruire la quasi-totalité de la berme (manque de 35cm, 4.2m nature)**. Cependant la position de la barre externe n'est pas modifiée car les vagues de plus faibles amplitudes ne parviennent pas à mobiliser suffisamment le sédiment. Pour ce qui est de l'évolution des vagues à la fin du montant (rouge tireté), nous notons une première diminution d'amplitude due au déferlement au passage de la barre externe puis les vagues se reforment à l'approche du haut de plage avant de déferler une seconde fois plus intensément. La variation de la hauteur des vagues (pente) est directement liée à la dissipation d'énergie, dans ce cas l'énergie de la houle incidente est principalement dissipée au niveau du haut de plage.

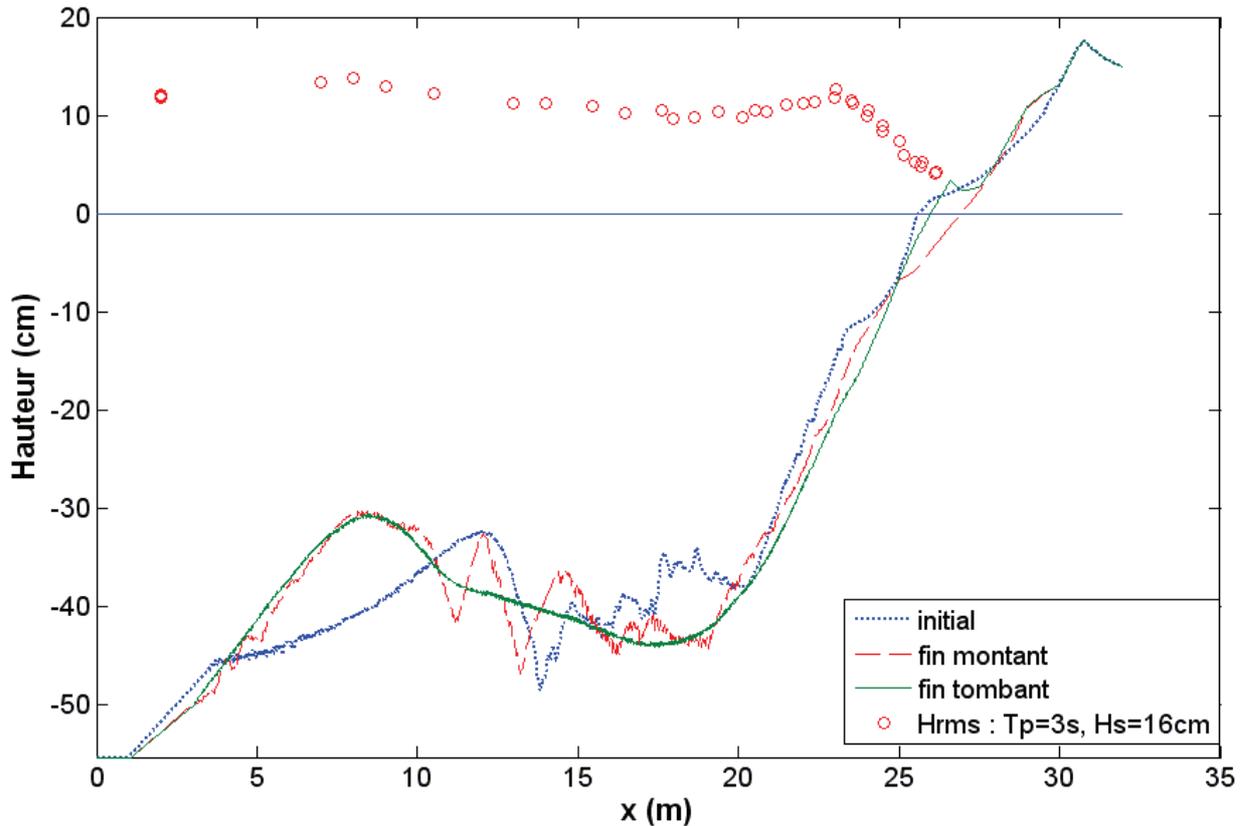


Fig. D.7 : Evolution des profils de fond et mesures des vagues de fin de montant au cours d'une tempête caractéristique.

Cas de rechargement dans la fosse de la barre externe :

Un volume de 0.16m^3 (500 m^3 linéaire nature) a été déposé au niveau de la fosse entre la barre externe et la zone interne (en turquoise sur la Fig. D8). **A la fin du montant de tempête (rouge tireté) la berme est érodée de 1m (12m nature), la barre externe est engraisée de 4cm (48cm nature) en hauteur et la fosse est partiellement comblée. Lors du tombant le profil de fond (vert) tend à nouveau à se lisser et reconstruire la berme (manque de 20cm, 2.4m nature). Toutefois, un surplus de sédiment est observé sur la partie haute de la berme.** Nous pouvons remarquer que le sédiment rechargé n'est pas venu se déposer directement sur le haut de plage mais en engraisant la barre externe et la fosse (déduit de la mesure des volumes profil par profil successifs), il contribue à dissiper plus régulièrement l'énergie de la houle. En effet, nous relevons à $x=23\text{m}$ (rond rouge) une amplitude des vagues plus faible ($H_{rms}=11.2\text{cm}$, 1.35m nature) que pour le cas de la tempête sans rechargement ($H_{rms}=12.5\text{cm}$, 1.5m nature). Cela se traduit par une dissipation moins forte au niveau du haut de plage.

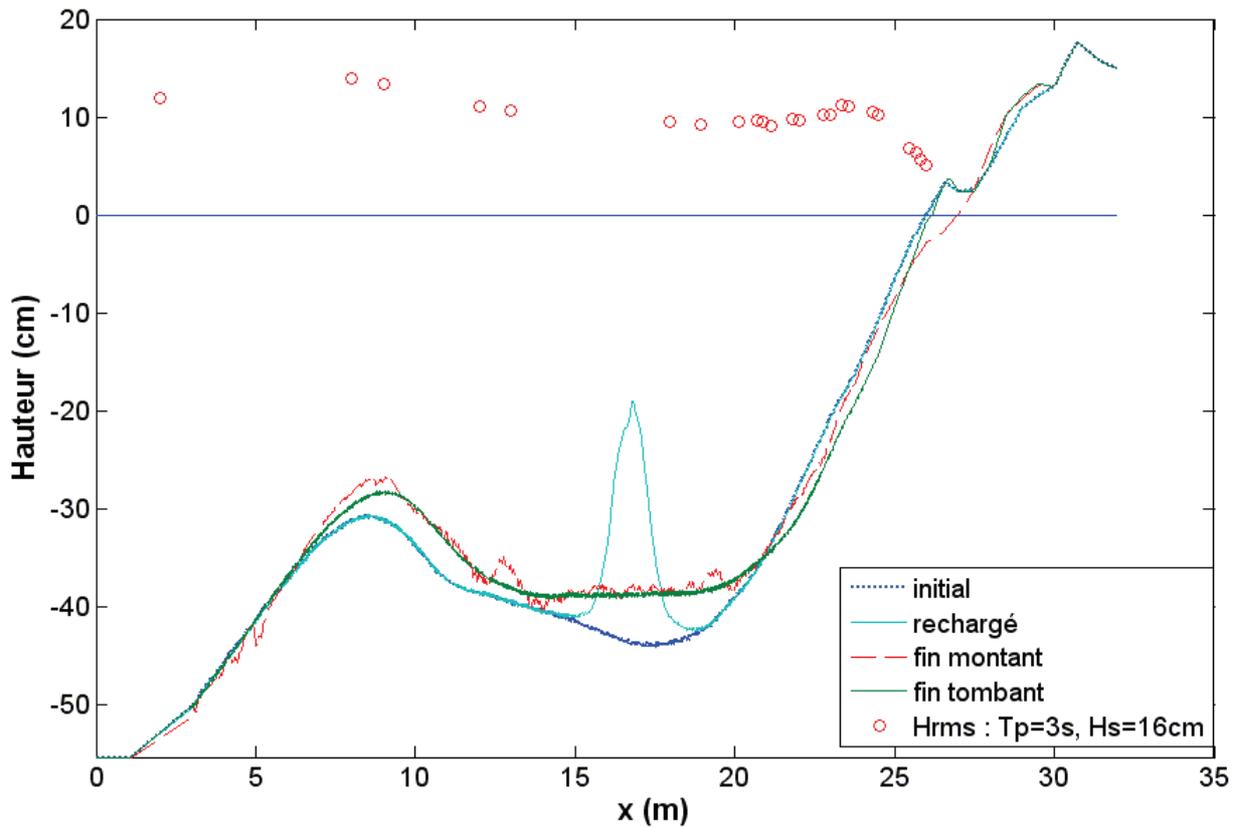


Fig. D.8 : Rechargement dans la fosse de la barre externe. Evolution des profils de fond et mesures des vagues de fin de montant au cours d'une tempête caractéristique.

Cas de rechargement sur la barre externe :

Le même volume que le cas précédent a cette fois été déposé sur la barre externe (en turquoise sur la Fig. D.9). Le scénario de tempête a sensiblement les mêmes effets sur l'évolution du fond et des vagues. **Le montant (rouge tireté) érode la berme de 70cm (8.4m nature) et engraisse la barre externe de 5cm (60cm nature)**, le plateau de la fosse n'est cependant pas modifié. A la fin du tombant (vert) nous retrouvons un profil de fond lissé avec une barre externe quasi-symétrique, **une berme reconstruite avec un manque de 20cm (2.4m nature) et une accumulation de sédiment sur le haut de la berme**. La pente de la zone interne tend à se raidir. Le renforcement de la barre externe augmente la dissipation de la houle à son passage et l'amplitude maximale des vagues sur le haut de plage diminue ($H_{rms}=10.8cm$, $1.3m$ nature). Le non-déplacement de la barre et son augmentation de hauteur est à relier à l'équilibre atteint avec l'apex du climat de houle imposé. Un changement de conditions du climat de houle entraînerait lui un recul de la barre comme cela à pu être observé sur certaines expériences.

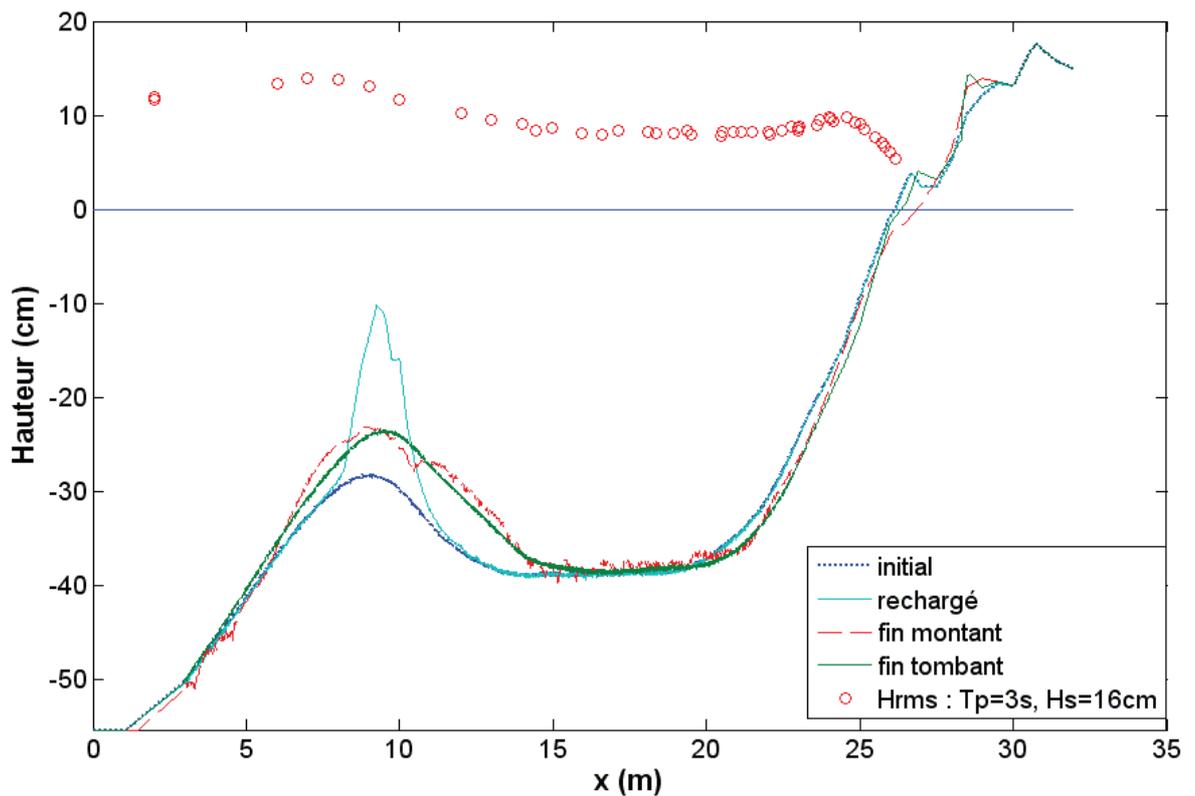


Fig. D.10 : Rechargement sur la barre externe. Evolution des profils de fond et mesures des vagues de fin de montant au cours d'une tempête caractéristique.

Cas de rechargement dans la zone interne :

Pour le dernier cas de rechargement, le même volume de sédiment a été déposé au niveau de la zone interne (en turquoise sur la Fig. D.10). Ce cas se rapproche de l'expérience n°1 mais diffère de ce dernier dans la mesure où le rechargement avait alors été fait sur le revers d'une barre interne peu formée en forme de terrasse, et qu'ici aucune barre interne n'est présente. Cette simulation plus délicate à mettre en place en nature à cause d'un déferlement très proche de la zone de dépôt, se détache des cas précédents en terme de bilan sédimentaire au niveau du trait de côte. Effectivement **la barre externe est peu modifiée (+2cm en hauteur, 24cm nature)** mais en contrepartie **la berme se voit fortement engraisée avec une avancée du trait de côte de 25cm (3m nature) à la fin du montant (rouge tireté) et de 15cm supplémentaires (1.8m nature) à la fin du tombant (vert)**. Nous pouvons également noter une **importante accumulation de sédiment sur le haut de la berme** et un raidissement de la pente de la zone interne. Les vagues se voient peu altérées (rond rouge), seul le déferlement en haut de plage est légèrement plus intense (distance de déferlement plus courte) dû à l'avancée du trait de côte.

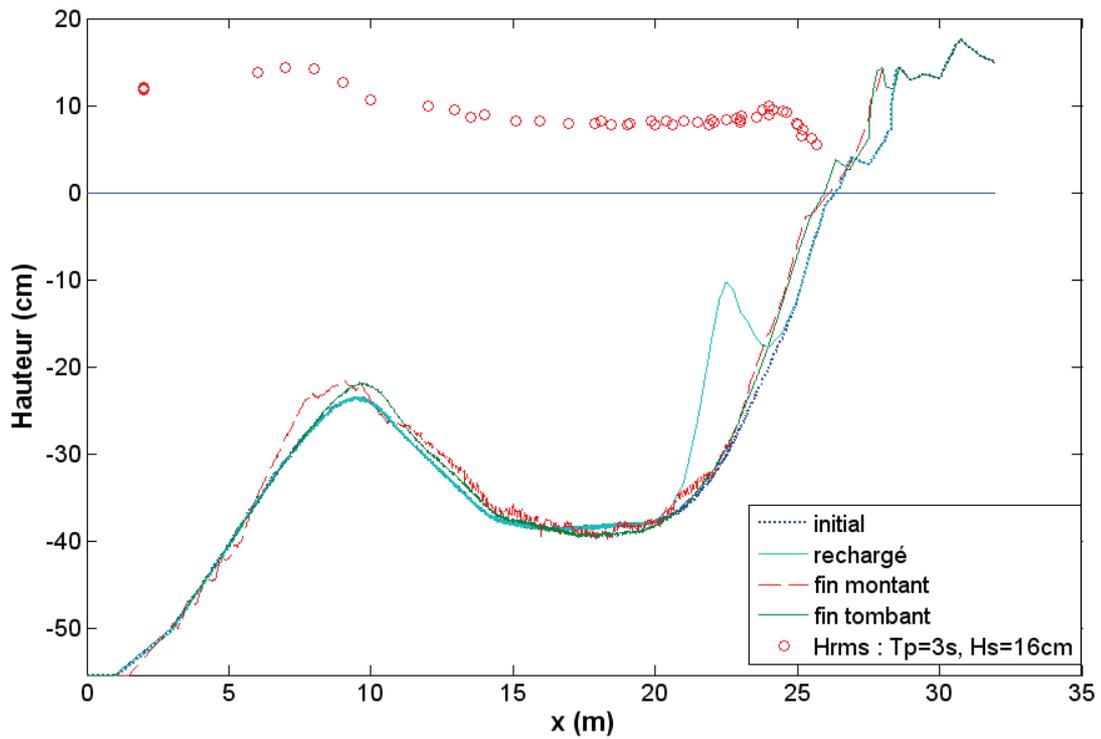


Fig. D.10 : Rechargement au niveau de la barre interne. Evolution des profils de fond et mesures des vagues de fin de montant au cours d'une tempête caractéristique.

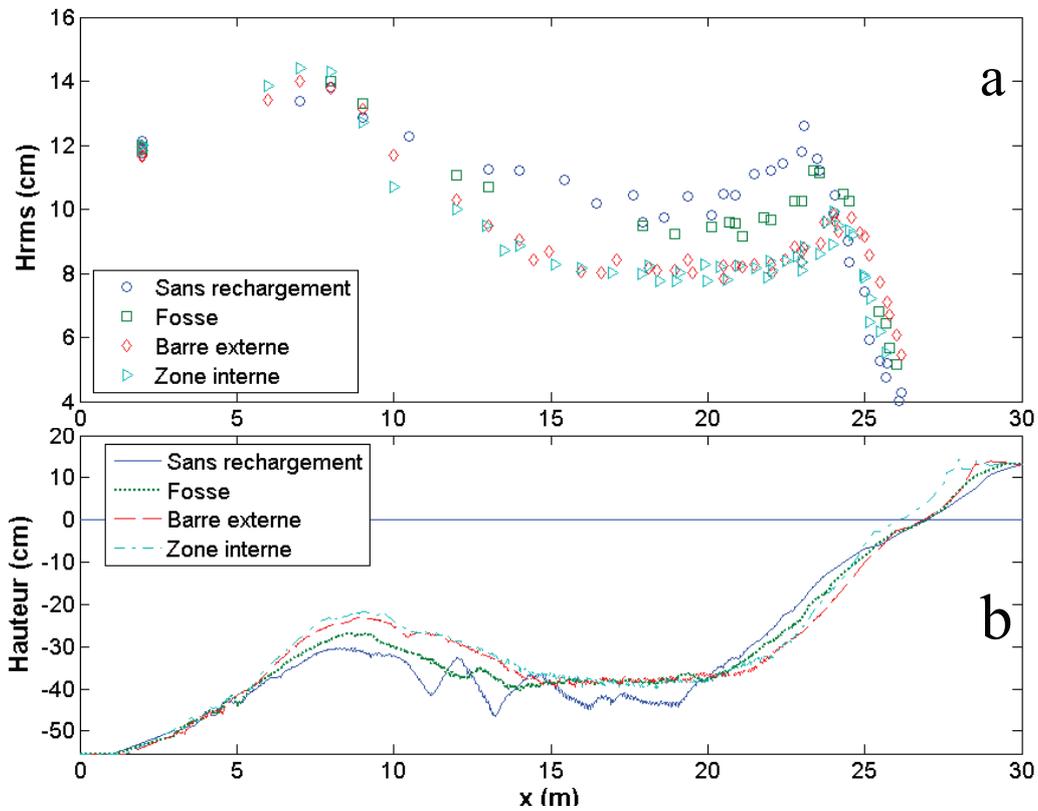


Fig. D.11 : Evolution de la hauteur (H_{rms}) des vagues (Figure a) et profils de fond correspondant (Figure b) à la fin du montant de tempête ($H_s=160\text{mm}$ / $T_p=3\text{s}$) pour les différentes simulations : sans rechargement, rechargement de la fosse, de la barre externe et de la zone interne.

La figure D.11 illustre qu'au début de l'expérience n°2 une forte dissipation (donc essentiellement la brisance) se produit au niveau du trait de côte (valeurs de Hrms en bleu). Puis qu'au fur et à mesure des rechargements, la brisance se produit de plus en plus au large au niveau de la barre externe et de moins en moins au niveau du trait de côte, ce qui illustre le rôle de protection de la barre sur le littoral proche. De plus, on peut conclure que **le matériel perdu par le haut de plage naturellement ou pour part des rechargements n'est pas perdu pour le système** et vient se positionner sur la barre en jouant un rôle bénéfique de rempart contre la houle.

Bilan des différents cas de rechargement d'avant-côte :

Plusieurs rechargements en sédiment d'avant-côte ont été simulés dans le canal à fond sédimentaire du LEGI. Le même scénario de tempête (succession de climats de houle basée sur les tempêtes caractéristiques observées sur la plage de Sète) a été appliqué dans chaque cas, seule la position du rechargement le long du profil de fond variait. Nous pouvons relever de manière générale que les rechargements dans la fosse et **sur la barre externe engraisse cette barre et augmentent donc le déferlement des plus grosses vagues à son passage.**

Cette dissipation de la houle plus progressive et moins localisée sur le haut de plage se traduit par **une érosion moins importante de la berme au cours des climats de houle les plus forts** (montant de tempête) et donc **une reconstruction plus efficace lors des climats de houle modérés (tombant de tempête).**

Pour le cas du rechargement dans la zone interne nous observons une faible modification de la morphologie de la barre externe **mais une très nette accrétion de sédiment sur le haut de plage.** La plus grande partie du sédiment rechargé est transporté vers le rivage, et fait ainsi avancer notablement le trait de côte. **Remarquons cependant que ce dernier rechargement a bénéficié des effets des deux précédents, il n'est donc pas possible de comparer de manière découpée ces différentes simulations.** On voit cependant que l'expérience 1 a montré l'efficacité de la remontée de sédiment dans un cas unique de rechargement de la zone interne sans aucune influence de la zone au large, ce qui valide son efficacité.

Synthèse et discussion

La figure D.12 met en évidence l'évolution du trait de côte (a) et de la berme (b) au cours des différents rechargements. **La tempête de référence s'est déroulée de t=0 à t=10 heures et les trois cas de rechargement suivent chronologiquement.** L'origine du trait de côte est définie au début de la tempête de référence, cela permet de suivre son recul et son avancée en fonction des vagues générées. Nous retrouvons les tendances définies dans les parties précédentes, **avec un recul du trait de côte à la fin de l'apex et une reconstruction en fin de montant.** Au fur et à mesure des rechargements, **le recul du trait de côte est moindre avec une meilleure reconstruction. Ceci est dû à l'engraissement de la barre externe ayant l'effet d'un « brise-lame ».** En d'autres termes, le rechargement de la barre externe

permet au trait de côte de ne pas reculer. Nous relevons même pour le cas de rechargement en zone interne (cas n°3, t=32-43h) une avancée du trait de côte en fin de tempête. Cette reconstruction est en partie due aux cas de rechargement précédents (cas n°2 et 3). La barre externe dissipant l'énergie de la houle à son passage va engendrer des vagues plus petites à l'approche de la côte ; ce sont ces vagues « reconstructrices » qui permettent le dépôt de sédiment sur le haut de plage. Nous retrouvons ainsi les conditions de houle de type « tombant de tempête » générées sur le cas de rechargement de l'expérience N°1 permettant la reconstruction de la berme.

La figure D.12b caractérise également l'évolution du haut de plage mais en mettant en avant le volume sédimentaire de la berme. Celui-ci correspond au volume de sédiment allant du trait de côte jusqu'au bout du profil (côté terre). La tendance générale est très similaire à celle de l'évolution du trait de côte ; cela confirme que la succession des cas de rechargements a bien mené à un engraissement de la partie découverte de la plage. **Ceci nous conforte dans l'idée que l'étude de l'évolution du trait de côte pour quantifier l'efficacité des rechargements est bien pertinente.**

Il faut toutefois remarquer que les houles maximales de notre tempête caractéristique correspondent à des tempêtes de type « classique » ($H_s = 160$ mm à l'entrée du système de barres, soit 1,9 m en nature et $T_p = 10,5$ s) que nous pouvons observer plusieurs fois dans l'hiver dans le milieu naturel. Pour le cas des tempêtes « exceptionnelles » (décennale), nous pouvons nous attendre à une réaction différente du profil de plage. Pour cela, une tempête de plus forte amplitude a été générée dans le canal ($H_s = 200$ mm, $T_p = 3.3$ s : $H_s = 2.4$ m, $T_p = 11.5$ s nature ; et qui correspond à ce qui peut être généré de plus fort dans le canal utilisé), nous avons ainsi observé **un arasement net de la barre externe.** Dans ce cas, la houle n'était plus dissipée sur cette barre et même les vagues de plus faibles amplitudes (correspondant au tombant de tempête) semblaient provoquer un recul net du trait de côte, en raison de la position bathymétriquement peu élevée de la barre externe. Ces conditions peuvent aboutir à la re-formation de la barre externe mais le retour de matériel pour la berme n'est jamais complet.

Sachant que les conditions les plus défavorables à la reconstruction du haut de plage sont des vagues fortes, sans barre externe, avec un tombant de tempête court, il semblerait donc intéressant dans le futur et dans un canal plus grand de tester ces cas de rechargement en générant des tempêtes « exceptionnelles » et des successions de tempêtes rapprochées (sans tombant). Cela nous permettrait de vérifier la stabilité et l'efficacité des rechargements à plus long terme. On atteint alors les limites d'utilisation du canal utilisé dans GESA tant dans la capacité de son batteur à générer ce type de tempête ($H_s = 4$ m à l'entrée du système de barres) que dans ces dimensions, notamment sa longueur qui ne permet pas de se placer dans des conditions de similitudes avec le milieu naturel pour de situations extrêmes de déferlement de la houle au large.

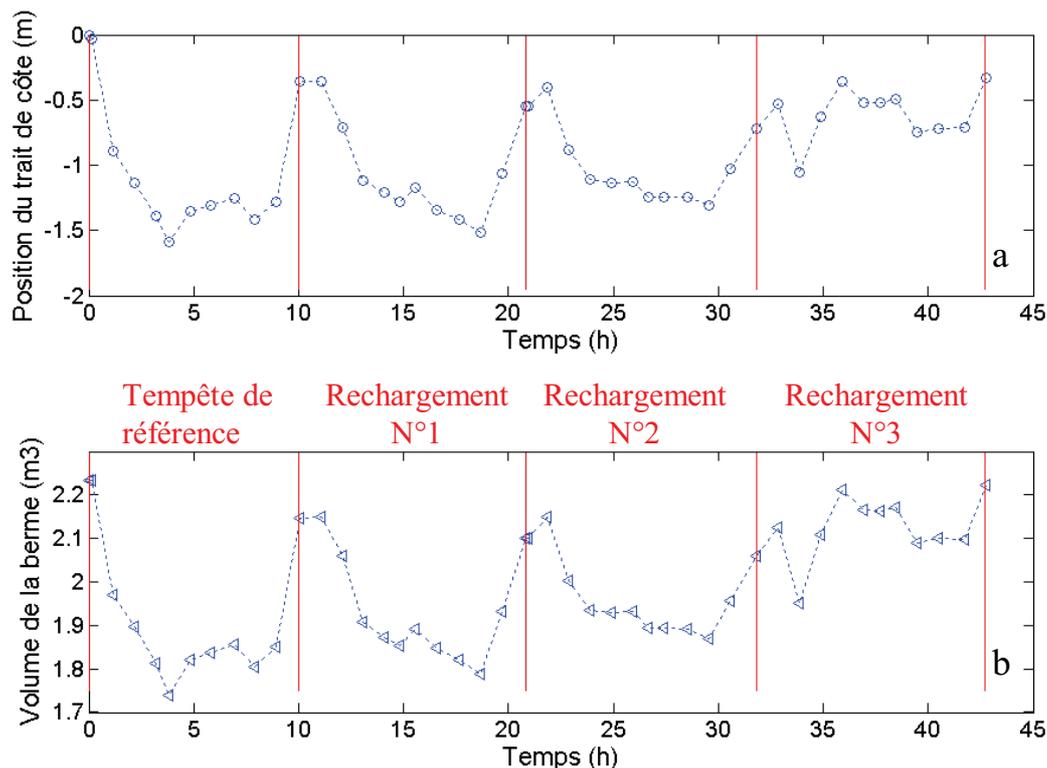


Fig. D.12 : Evolution du trait de côte (a) et du volume de la berme (b) au cours des différents rechargements.

Analyse de l'évolution granulométrique des cas de rechargement :

L'influence de la taille du sédiment rechargé sur la stabilité des plages est maintenant largement reconnue (Van Duin *et al.*, 2004 ; Grunnet and Ruessink, 2005). Néanmoins, parmi les études analysant les effets des rechargements sableux sur la morphodynamique des plages, peu se sont particulièrement intéressés à l'évolution de la distribution granulométrique le long du profil de plage transversal. Benedet *et al.* (2004) présentent des prélèvements granulométriques en surface le long de profils de plage transversaux post-rechargement. Cependant, les discrétisations spatiale (~50 m) et temporelle (~1 an) restent faibles. Sur une plage non-rechargée, Masselink *et al.* (2007) ont focalisé leur analyse granulométrique en surface sur la zone intertidale pendant une vingtaine de jours. Cela leur a permis d'augmenter considérablement les discrétisations spatiale (~5 m) et temporelle (~12 h). Pourtant, ils n'observent pas de distribution granulométrique cohérente et ne trouvent pas de corrélation nette avec les réponses morphologiques. Les conclusions principales pour le cas de Terschelling (Nourtec, 1997) sont que le volume apporté a nourri la plage de manière efficace. Un transport sélectif des sédiments s'est produit sous l'action de l'asymétrie de la houle, les sables les plus grossiers étant remontés vers la côte par charriage (Hoekstra & Houwman, 1997). Par la suite, le rechargement a seulement un impact très local et très temporaire sur la distribution granulométrique de la zone (Guillen & Hoekstra, 1997). Les barres ont aussi bénéficié de cet apport et leur comportement a été totalement modifié puisqu'elle migrent alors vers la côte en grossissant alors que dans la zone adjacente non influencée par le rechargement, elles ont le comportement inverse (Kroon et al., 1994). La dispersion du sédiment latéralement est faible, ainsi que les pertes vers le large qui sont négligeables (Kroon et al., 1994). La modélisation physique bidimensionnelle menée dans le

canal du LEGI apporte ici de nouveaux éléments sur la distribution spatiale transversale suite aux scénarios de tempête et rechargement.

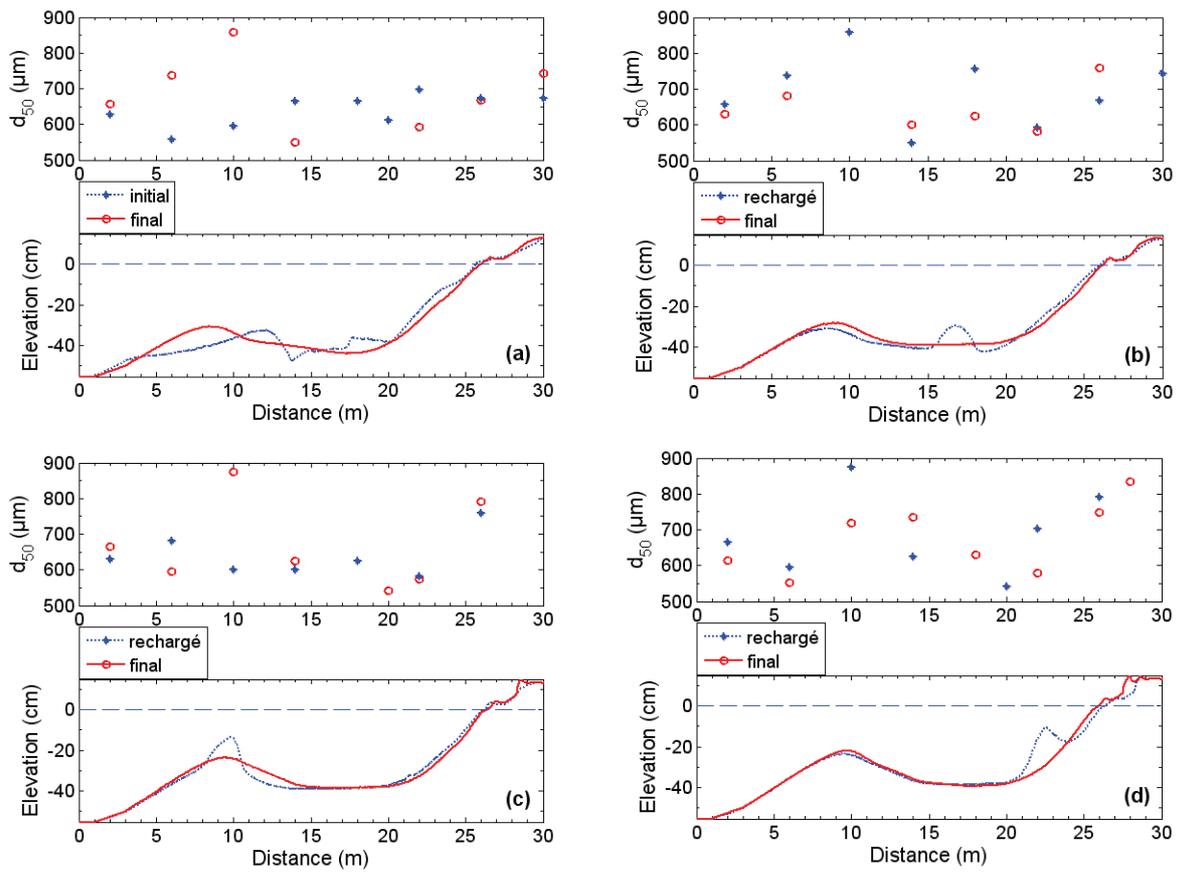


Figure D.13. Evolution du diamètre médian du sédiment (d_{50}) le long des profils de plages transversaux initiaux (---,+) et finaux (—,○). a) Tempête sans rechargement, b) tempête avec rechargement de la fosse, c) tempête avec rechargement de la barre externe et d) tempête avec rechargement de la zone interne (d).

Un suivi de la granulométrie du sédiment a été mené au cours des quatre scénarios de tempête (Fig. D.13). Le long des profils de plage transversaux initiaux et finaux, des échantillons ont été prélevés en surface (~ 1 cm de profondeur), sauf pour le profil final du dernier rechargement (Fig. D.13d, —,○) où la mesure représente la granulométrie moyenne sur 3 cm d'épaisseur. Le granulomètre laser « MALVERN : Mastersizer 2000 » permet, par diffraction, d'établir la courbe granulométrique d'un échantillon donné. La gamme de mesure de l'appareil se situe entre 0.02 de 2000 μm , la granulométrie du sédiment utilisé ici se trouve entre 400 et 1000 μm . Dans le cadre de nos mesures, la reproductibilité entre deux échantillons provenant du même prélèvement est relativement bonne (5%). Nous avons pu observer une évolution similaire des d_{10} , d_{50} et d_{90} (i % des grains ont un diamètre moyen plus petit que d_i), nous présentons ainsi seulement les résultats du d_{50} représentatif de l'ensemble de l'échantillon.

L'analyse granulométrique suivante aborde deux aspects : i) la distribution granulométrique spatiale le long des profils de plage transversaux ; ii) l'évolution temporelle de la granulométrie au cours des différents scénarios de rechargement. La Figure D.13 synthétise

les mesures granulométriques (d_{50}) pour chaque début et fin de tempête. Le profil initial de la Figure D13a (···) présente une distribution granulométrique quelconque (+), puis la tempête remodèle fortement la plage (-) et fait ressortir une distribution granulométrique spatiale très marquée (●). Les sédiments les plus grossiers se trouvent au niveau de la barre externe ($d_{50}=858 \mu\text{m}$) et du haut de plage ($742 \mu\text{m}$) alors que les plus fins sont observés dans la fosse ($550 \mu\text{m}$) et le pied de plage ($657 \mu\text{m}$). Les sédiments déposés ($d_{50}=756 \mu\text{m}$) lors du premier rechargement (Fig. D.13b) modifient la distribution granulométrique précédente à $x=18 \text{ m}$. Le scénario de tempête tend à nouveau à concentrer les sédiments grossiers en haut de plage ($759 \mu\text{m}$) mais l'absence de mesure en $x=10 \text{ m}$ ne permet pas de confirmer ce scénario sur la barre. En revanche, la tempête simulée sur le rechargement de la barre externe (Fig. D.13c) exagère la tendance à rassembler les sédiments les plus grossiers sur la barre ($874 \mu\text{m}$) et le haut de plage ($790 \mu\text{m}$), malgré des sédiments rechargés plus fins ($d_{50}=602 \mu\text{m}$ en $x=10 \text{ m}$). Le cas de rechargement de la zone interne ($d_{50}=702 \mu\text{m}$, Fig. D13.d) présente la même tendance, à la différence que les sédiments grossiers ne sont pas exclusivement localisés sur la barre. Les sédiments rechargés ont été dispersés vers le haut de plage mais également vers la barre externe. C'est ce sédiment qui semble recouvrir la fosse entre $x=10\text{-}14 \text{ m}$ ($d_{50}=718$ et $736 \mu\text{m}$). Il ressort également une différence entre la granulométrie initiale (+) et finale (●) à $x=2$ et 6 m , cela peut s'expliquer par une différence entre la taille des grains en surface avec ceux des 3 premiers centimètres de profondeur.

En résumé, l'ensemble des scénarios présentés sur la Figure D.13 présente une distribution granulométrique marquée et une dynamique caractéristique. Les sédiments les plus grossiers sont localisés au niveau de la barre externe et du haut de plage, alors que les plus fins se trouvent au niveau de la fosse et du pied de plage. Le déferlement des vagues sur la barre et le haut de plage induit une forte agitation hydrodynamique, les sédiments fins seraient davantage mis en suspension et ainsi dispersés par les courants vers les zones plus profondes moins agitées (pied de plage, fosse). Cette tendance à trier le sédiment, en augmentant la granulométrie là où la dissipation est la plus forte, est cohérente avec les observations de Masselink *et al.* (2007) sur le haut de plage. En effet, les auteurs remarquent une tendance à l'augmentation de la taille du sédiment lors des conditions de houle fortement énergétiques. Il faut également souligner que la granulométrie des rechargements variait entre $d_{50}=602$, 702 et $756 \mu\text{m}$ et que des comportements similaires ont été observés dans les trois cas. Il faudrait modifier de manière plus importante la taille du sédiment rechargé pour noter un réel effet. Cette analyse s'est basée sur des prélèvements granulométriques de surface ne permettant pas de prendre en compte le tri sur la verticale. Des échantillons ont été prélevés en profondeur par carottage mais la discrétisation temporelle des relevés ne nous permet pas de dégager des tendances particulières, ni de confirmer ou infirmer un réel processus de tri granulométrique. Comme le soulignent Masselink *et al.* (2007), une meilleure estimation de la distribution granulométrique verticale permettrait d'avancer dans la compréhension de la dynamique sédimentaire et mieux corréler les évolutions granulométriques et morphologiques. Des expériences futures focalisées sur un suivi granulométrique de haute résolution spatiale et temporelle peuvent apporter des éléments de réponse à cette problématique.

D.8 Conclusion générale pour le modèle physique et l'expérience 2

Conclusion

On remarque en canal à houle et sédiment **une bonne efficacité des rechargements d'avant-côte quelque soit leur position sur le profil du moment que le tombant de tempête est suffisant long et bien modélisé et que les conditions d'agitations ne sont pas extrêmes.**

Pour des conditions de tempêtes qui se rapprochent (car les dimensions du canal ne permettent pas de créer de fortes tempêtes) des **tempêtes exceptionnelles** simulées numériquement, **on observe par contre des érosions du rechargement et une remontée difficile du matériel post-tempête.** Les dimensions du canal ne permettant pas de creuser cette piste de recherche et de conclure, il faudra donc passer dans le futur à des structures plus grandes.

L'ensemble des scénarios présente une distribution granulométrique marquée et une dynamique caractéristique. Les sédiments les plus grossiers sont localisés au niveau de la barre externe et du haut de plage, alors que les plus fins se trouvent au niveau de la fosse et du pied de plage. Le déferlement des vagues sur la barre et le haut de plage induit une forte agitation hydrodynamique, les sédiments fins seraient davantage mis en suspension et ainsi dispersés par les courants vers les zones plus profondes moins agitées (pied de plage, fosse).

La méthodologie qui consiste à **découper la tempête en deux phases, le montant et le tombant s'avère payante et valide.** L'analyse séparée de ces deux phases permet de montrer que la phase de montant érode et que la phase de tombant engraisse la plage. **C'est surtout le tombant de tempête qui conditionne la réponse finale.** C'est donc le ratio entre ces deux phases, peut être plus que la hauteur maximum lors de l'apex de la tempête qui conditionne la réponse du profil. Ceci permet d'expliquer une bonne part des divergences entre modèles numériques et modèle physique. Cela souligne aussi le problème des études *in-situ* qui ne permettent pas, par des approches de bathymétrie classiques avant et après tempêtes, de diagnostiquer l'évolution réelle du profil pendant le forçage.

Dans ce cadre, on peut aisément imaginer que ce sont les successions rapprochées de tempêtes qui auront les effets les plus dévastateurs pour les rechargements.

De manière plus anecdotique, de grosses difficultés sont apparues dans l'expérience 2 pour obtenir la formation d'une barre interne en plus de la formation de la barre externe au large. Ceci semble lié à la présence d'un plancher dur sous-jacent lors de l'expérience 1 et absent lors de l'expérience 2. Dans le cas de la présence d'un plancher, le creux de la fosse de la barre interne qui se crée ne peut pas évoluer longtemps en profondeur et atteindre un équilibre, ce qui entraîne une évolution rapide de la barre interne. Dans l'expérience 2 où le fond n'est plus présent, la fosse externe peut se creuser à « l'infini » ce qui semble rendre difficile la formation de la barre interne. La question se pose alors pour les sites naturels qui présentent un plancher gréseux comme à Sète du devenir de la plage qui sera encore plus attaquée si la fosse ne peut pas l'être.

Perspectives

En parallèle à l'étude de l'évolution des profils de fond et des mesures de vagues des différentes simulations, un suivi photographique de la topographie a été réalisé. Grâce aux dépôts de sédiments blancs sur le fond et les sédiments en place rouge, nous avons pu suivre l'évolution de ces rechargements le long du canal au cours du temps. Une première analyse qualitative nous aide à caractériser le transport sédimentaire, notamment au niveau de l'avancée du trait de côte (voir Fig. D.14, qui concerne le cas n°3 de l'expérience 2 c'est-à-dire le rechargement de la zone interne). Mais une étude quantitative nous permettrait de mesurer les volumes de sédiment échangés et mélangés le long de la plage au cours des scénarii de tempête.

Dans le futur, il apparaît aussi nécessaire de réaliser des simulations dans un canal de plus grande envergure à l'échelle 1/1 pour s'affranchir des problèmes de réductions d'échelle.

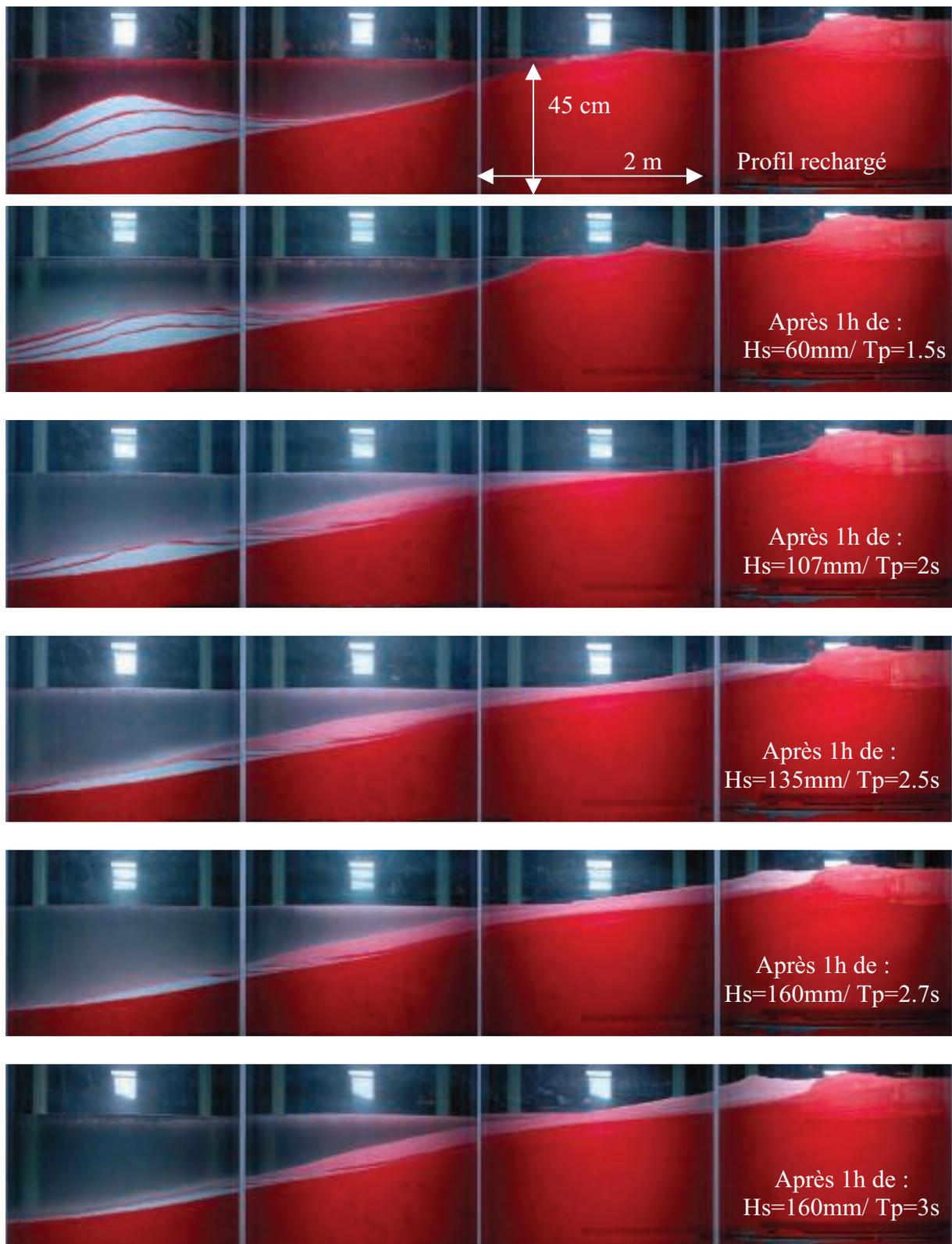


Fig. D.14 : Evolution d'un rechargement de sédiment dans la zone interne (cas 3 de l'expérience 2) au cours d'un montant de tempête : 1) profil rechargé ; 2) après 1h de $H_s=60\text{mm}$ / $T_p=1.5\text{s}$; 3) après 1h de $H_s=107\text{mm}$ / $T_p=2\text{s}$; 4) après 1h de $H_s=135\text{mm}$ / $T_p=2.5\text{s}$; 5) après 1h de $H_s=160\text{mm}$ / $T_p=2.7\text{s}$; 6) après 1h de $H_s=160\text{mm}$ / $T_p=3\text{s}$.

Comparaison modèles numériques/modèles en canal/terrain

Finale­ment l'idée de départ qui était de croiser l'utilisation de modèles numériques et de modèles physiques en raison de leurs capacités respectives à plus ou moins bien simuler certaines situations s'avère efficace. Les modèles numériques simulent bien l'érosion, tout en l'exagérant dans certains cas ; à l'inverse le modèle physique reproduit bien les phases d'accrétion et d'engraissement de la plage mais les réductions d'échelles réalisées, le place de fait dans des situations plutôt favorables de tempête classique. L'approche croisée permet de diagnostiquer précisément le principal point de divergence des réponses des deux approches de simulations : pour les modèles numériques la tempête est mal discrétisée et le temps de tombant minoré ; alors que la phase de tombant de tempête est clairement identifiée dans le canal comme le seul moment du retour du sable vers la côte.

En fait, les conditions imposées dans le canal sont nettement moins énergétiques à ce qui est imposé dans les modèles numériques, sans même parler de la mauvaise prise en compte du tombant. Ceci doit expliquer les divergences qui peuvent être observées comme les résultats très positifs du canal qui sont certainement à minorer. Les résultats ne peuvent et ne doivent être considérés qu'à la lueur de cette réalité, qui souligne la difficulté de ramener tous les cas aux mêmes conditions de temps et d'espace.

De plus, l'analyse détaillée des échelles temporelles entre les modèles numériques et le modèle physique montre l'influence forte des durées de simulations considérées. Dans le canal, l'équivalent nature des tombants de tempête serait de plusieurs jours, alors que les modèles numériques s'attachent surtout à simuler l'évolution du rechargement à l'échelle événementielle (tempête de 24 h par exemple en configuration d'apex permanente). Lorsqu'on teste numériquement des simulations plus longues de faible houle, les résultats des modèles numériques convergent vers celui des expérimentations en canal. Ceci a été très clairement observé sur plusieurs sites de l'Hérault mais reste moins vrai pour les sites étudiés dans ce projet. Dans le futur, seuls des modèles capables de simulations sur des temps longs (saisonniers par exemple) devront servir aux diagnostics d'études appliquées comme les rechargements. Mais ces modèles restent à construire et doivent passer par des validations sur des cas *in-situ* mesurés comme les cas de rechargements hollandais méso-tidaux.

Tâche E : Estimation des coûts (Sogreah)

Dans cette Tache E le but est de chercher à étudier la faisabilité technique et les coûts associés des opérations de rechargement telles qu'elles ont pu être simulées lors des scénarios de modélisations numériques. Ainsi à partir des profils utilisés et des volumes linéaires qu'il a été décidé d'utiliser pour les simulations, on a cherché à déterminer aussi les différents facteurs qui influencent le prix du m³ de rechargement, comme la distance du site de prélèvement (avec une prise en compte de différentes distances entre zone de prélèvement et de dépôt 3 à 25 km), la capacité de la drague, le volume de sédiment apporté. Le cas de l'avant-côte de Leucate est prise comme exemple, des éléments de chiffrage pour l'avant-côte de Sète ayant été déjà fournis dans le rapport LITEAU I. Par ailleurs, il a été décidé de rajouter deux paragraphes qui traitent des aspects dragages en grande profondeur et de la présence de fines dans le matériel prélevé en raison des préoccupations actuelles en Languedoc-Roussillon.

Il est successivement présenté :

- Les solutions retenues,
- La description des moyens nécessaires pour les réaliser,
- L'estimation des coûts.

E.1 Solutions retenues

Les diverses modélisations réalisées ont montré que le rechargement de la barre externe telle que représentée sur le profil 3 (Figure E.1: PROFIL 3 : rechargement de la barre) ou la création d'une barre surnuméraire telle que représentée sur les profils 7 et 9 (Figure E.2 : Profil 7 : rechargement de la barre et Figure E.3 : profil 9 : rechargement de la barre) constituent des moyens efficaces pour lutter contre le processus d'érosion.

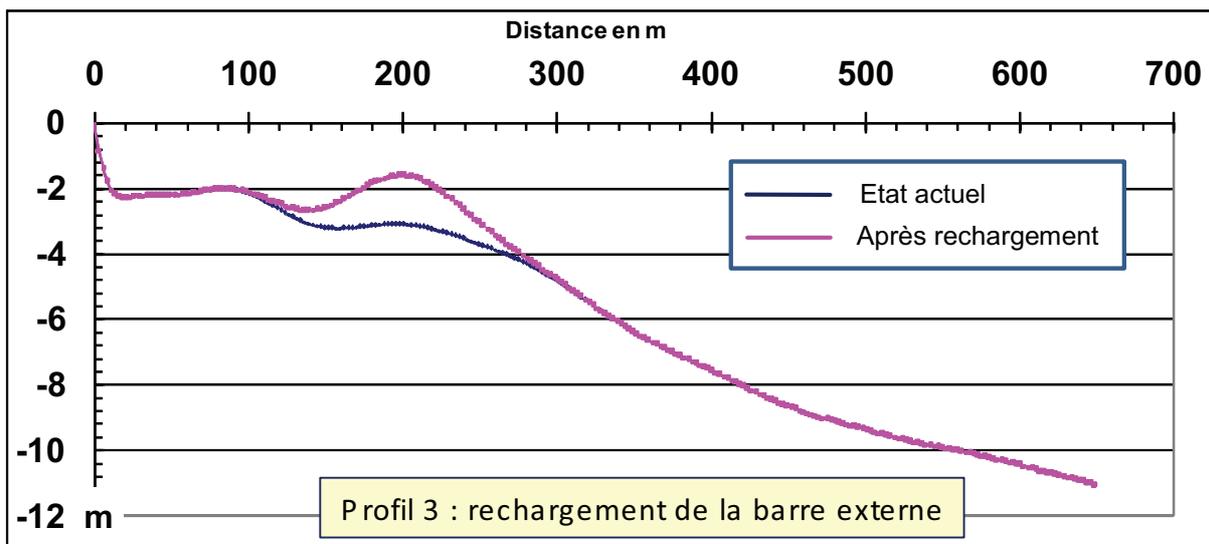


Figure E.1: PROFIL 3 : rechargement de la barre externe

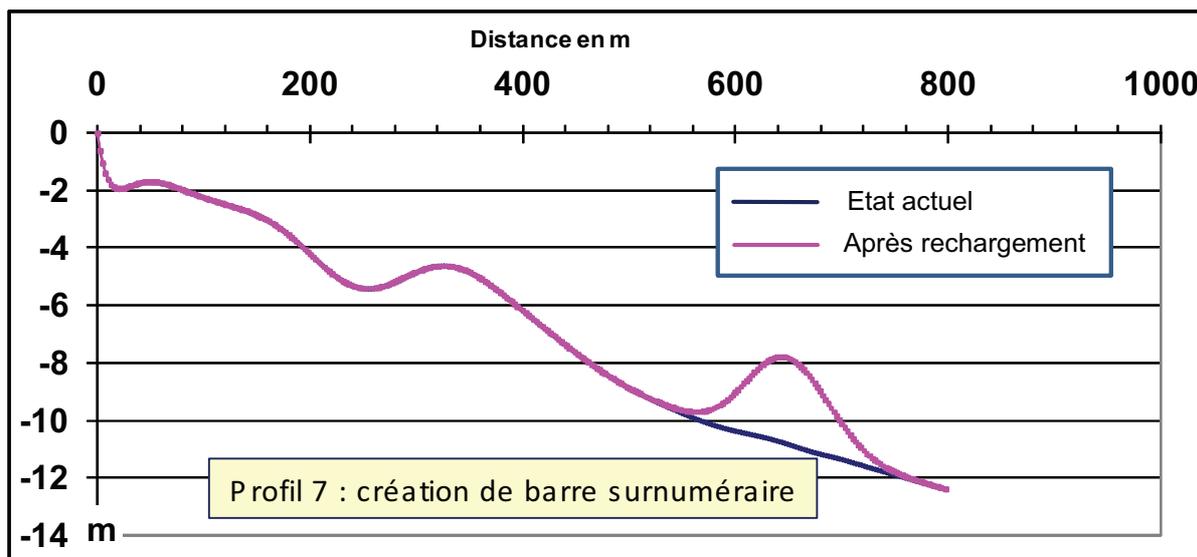


Figure E.2 : Profil 7 : rechargement de la barre surnuméraire

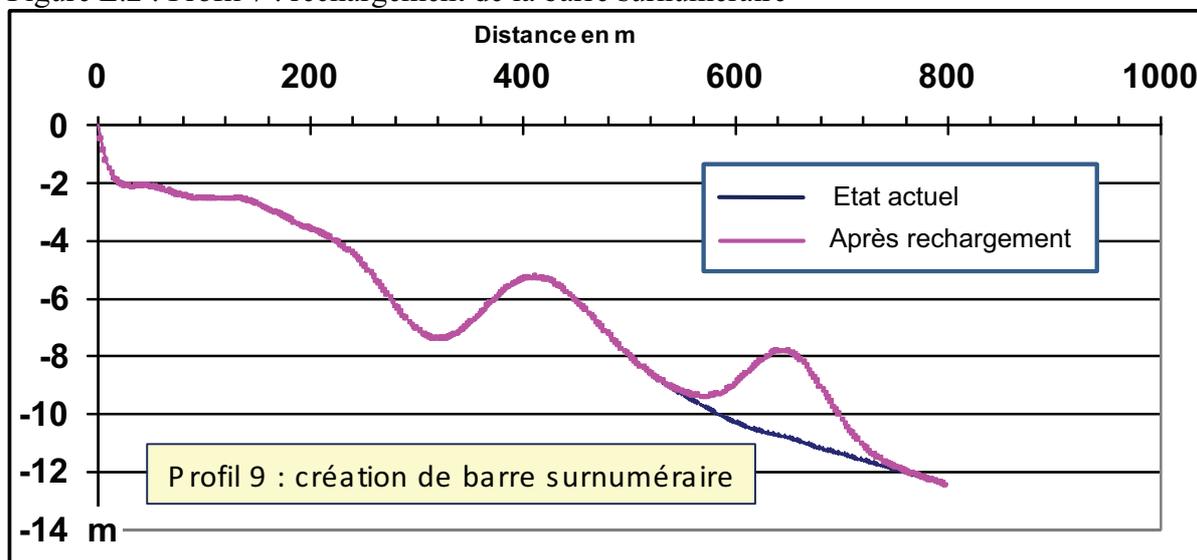


Figure E.3 : profil 9 : rechargement de la barre surnuméraire

Les volumes à apporter par mètre de littoral sont les suivants :

- Barre externe (profil 3) : 145 m³/m
- Barre surnuméraire (profil 7 ou profil 9) : 290 m³/m
- Barre externe (profil 3) + barre surnuméraire (profil 7 ou 9) : 435 m³/m

L'estimation des coûts été réalisée en prenant en compte 3 hypothèses relatives au linéaire de littoral concerné par le rechargement :

- Hypothèse 1 : linéaire de 1 000 m
- Hypothèse 2 : linéaire de 2 000 m
- Hypothèse 3 : linéaire de 3 000m

Ceci qui conduit aux volumes suivants à mettre en place.

Solution	Volume (m ³) à apporter		
	Hypothèse 1	Hypothèse 2	Hypothèse 3
Barre externe	145 000	290 000	435 000
Barre surnuméraire	290 000	580 000	870 000
Barre externe + barre surnuméraire	435 000	870 000	1 305 000

E.2. Moyens à mettre en œuvre

E.2.1. Dragage aspiratrice en marche – Dragage du sédiment sur la zone de prélèvement.

Le rechargement sera effectué par moyens maritimes à l'aide d'une drague aspiratrice en marche (voir figure E.4)

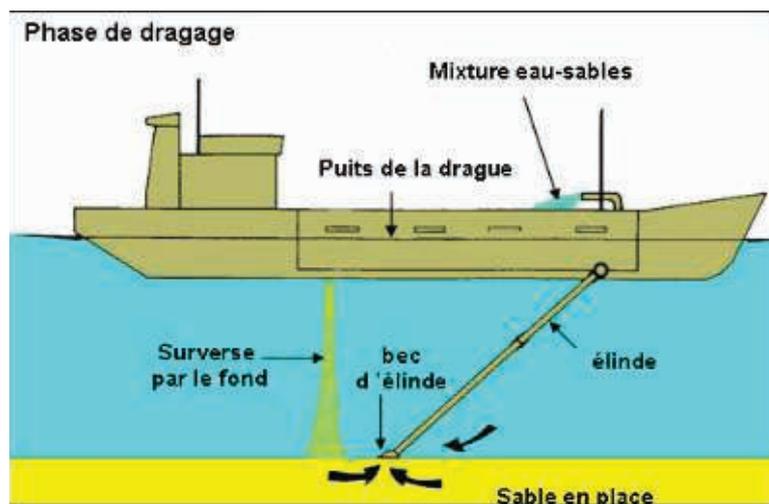


Figure E.4 : DRAGUE ASPIRATRICE EN MARCHE

Une drague aspiratrice en marche (DAM) est une drague hydraulique qui retire les sédiments du fond grâce à une pompe centrifuge qui crée une dépression du côté de l'admission (au bec d'élince) et aspire une mixture eau-sédiments (15 à 20% de sédiments environ) qui sont amenés dans la trémie ou puits de la drague. Pour optimiser le remplissage du puits, il est procédé lors du dragage à de la surverse qui consiste à évacuer par trop-plein l'eau (et les sédiments fins) du puits pour augmenter la quantité de matériaux présents dans le puits.

E.2.2. Possibilités de mise en place du sable sur les zones à recharger

Une fois le puits de la drague rempli, la drague se déplace vers la zone à recharger pour déposer les sédiments. La procédure de mise en place des matériaux va dépendre de la profondeur à laquelle il faut les déposer. Plusieurs techniques sont possibles :

- Le clapage,
- Le rejet à l'aide d'un canon,
- Le refoulement à l'aide d'une canalisation.

Il convient de noter que l'on recherche à mettre en œuvre, pour minimiser les coûts, un matériel de dragage ayant la capacité la plus importante possible c'est-à-dire avec un tirant d'eau le plus important possible compte tenu des fonds au droit et au large de la zone à recharger..

E.2.2.1. Le clapage

Les matériaux du puits sont clapés sous la drague par ouverture de portes situées sous le fond de la drague. Il faut que la hauteur d'eau sous la drague soit au moins égale au tirant d'eau de la drague + l'ouverture des portes soit 2 à 3 m + le clair sous quille de 0,5 m minimum. (Figure E.5 : Clapage des sédiments).

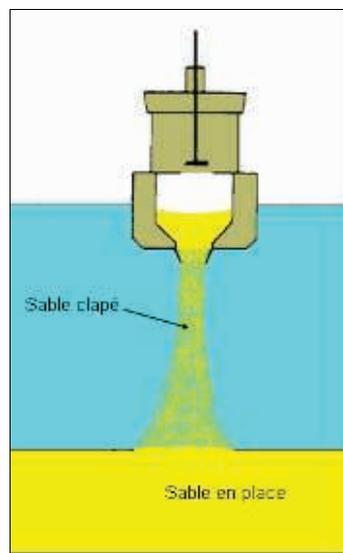


Figure E.5 : Clapage des sédiments

E.2.2.2. Le rejet à l'aide d'un canon

Dans ce cas la drague refoule une mixture sable-eau par l'intermédiaire d'un canon situé généralement à l'avant du navire (Figure E.6 : Refoulement par un canon). La distance atteinte est de l'ordre de 100m suivant la puissance de la drague. Il faut donc qu'à 100 m de la zone à rejeter il y ait une hauteur d'eau égale au tirant d'eau de la drague + le clair sous quille soit 0,5 m minimum.



Figure E.6 : Refoulement par un canon

E.2.2.3. Rejet à l'aide d'une canalisation

Une canalisation posée sur les fonds est mise en place entre une bouée située au large et la zone de dépôt. A l'extrémité côté terre de la canalisation se trouve un ponton flottant qui supporte l'extrémité de la canalisation. Ce ponton est relié à la canalisation posée sur les fonds par une canalisation souple permettant au ponton d'être déplacé pour couvrir une certaine zone sans déplacer la canalisation fixe. La drague vient s'amarrer à la bouée, se relie à la canalisation en place par une canalisation souple et refoule une mixture eau-sédiment (Figure E.7 : Rejet par une canalisation).

La canalisation posée sur les fonds doit être déplacée au fur et à mesure que le rechargement progresse. Ce déplacement de conduite est effectué en obstruant les deux extrémités de la conduite et en la remplissant d'air ce qui permet sa flottaison et déplacement.

La canalisation peut avoir une longueur très variable (de quelques centaines de mètres à 2 à 3 km ou même plus).

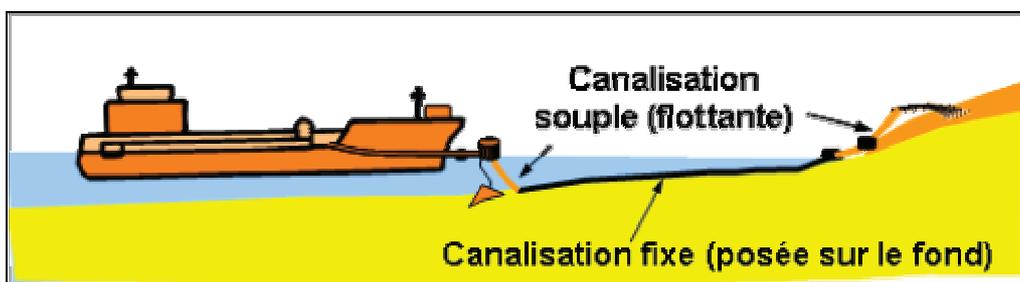


Figure E.7 : Rejet par une canalisation

Remarque : Une drague aspiratrice en marche moderne permet de réaliser les 3 types de refoulement indiqués ci-dessus.

E.2.3. Choix de mise en place du sable en fonction de la zone à recharger

E.2.3.1. Barre externe

L'apport de sable doit se faire à l'aide d'une canalisation comme indiqué ci-avant. Si le rechargement de la barre externe est couplé à la création d'une nouvelle barre surnuméraire plus au large il conviendra d'adapter la longueur de la canalisation au tirant de la drague qui sera utilisé pour cette dernière opération.

E.2.3.2 Nouvelle barre surnuméraire au large

Pour créer une nouvelle barre surnuméraire les sables doivent être apportés dans des fonds de l'ordre de -10m avant rechargement et de l'ordre de -8m (crête de la nouvelle barre) après rechargement.

Par clapage le tirant d'eau de la DAM utilisable doit être de l'ordre de 6 m ce qui correspond à une drague ayant un puits de l'ordre de 3 000 m³ soit environ 2000 m³ équivalent en place compte tenu du foisonnement dans le puits et du non remplissage complet de ce dernier.

Le rejet à l'aide d'un canon n'est pas utilisable pour la barre externe car la hauteur d'eau est trop faible à 100 m de la barre à recharger. Le rechargement de la barre surnuméraire par ce moyen n'est économiquement pas intéressant car plus long et donc plus coûteux que le clapage.

E.3. Estimation des coûts

Le coût d'une opération de rechargement se décompose en :

Coûts fixes :

- Amenée repli du matériel qui correspond au coût d'amenée de la drague et bateau de service depuis son port d'attache jusqu'au lieu des travaux et le retour au port d'attache, Pour une drague de 3 000 m³ en puits, ce coût est 400 000 €HT,
- Fourniture, mise en place, déplacements et retrait de la conduite de refoulement (quand une conduite est nécessaire), pour une conduite de 500 m le coût est de 1 000 000 €HT
- Des coûts divers (levés bathymétriques avant et après, plans d'exécution, prélèvements de sédiments, etc) : 100 000 €HT.

Coût fonction du m³ mis en place qui est lié à la durée de cycle de dragage et donc au volume apporté chaque jour sachant que le coût journalier de la drague est de 45 000 €HT.

Le cycle de dragage comprend :

- La durée de dragage pour remplir la drague : 2h 30 mn,
- La durée du trajet aller – retour entre la zone de dragage et la zone de refoulement, sachant que la drague se déplace à 8 noeuds en moyenne cette durée donnée ci-dessous pour des distances entre zone de prélèvement et de dépôt de 3, 5, 10, 15, 20 et 25 km.

Durée (mn) du trajet aller - retour entre zone de dragage et de dépôt						
Distance (km) zone - dragage - zone dépôt	3	5	10	15	20	25
Durée aller - retour (vitesse = 8 noeuds)	20	33	65	98	131	163

- La durée pour vider la drague qui est de :

- 10 mn pour un clapage (temps incluant celui des manœuvres nécessaires pour bien positionner le bateau),
- 2 h00 pour un refoulement par canon,
- 1h10 pour un refoulement par canalisation.

Ceci conduit aux durées du cycle de dragages suivantes fonction de la distance et du moyen de mise en dépôt.

Durée du cycle de dragage (mn)

Type de mise en dépôt	Distance (km) zone - dragage - zone dépôt					
	3	5	10	15	20	25
Clapage	180	193	225	258	291	323
Canon	290	303	335	368	401	433
Refoulement	250	263	295	328	361	393

Les volumes transportés par jour, sur la base de 2 000 m³ par cycle de dragage sont les suivants :

Volume (m³) mis en place par jour

Type de mise en dépôt	Distance (km) zone - dragage - zone dépôt					
	3	5	10	15	20	25
Clapage	16 035	14 947	12 780	11 161	9 906	8 905
Canon	9 944	9 515	8 588	7 825	7 187	6 645
Refoulement	11 538	10 964	9 751	8 779	7 984	7 321

Cela conduit au prix du m³ suivants, sur la base d'un coût journalier de la drague de 45 000 €HT :

Coût du m³ (€HT)

Type de mise en dépôt	Distance (km) zone dragage - zone dépôt					
	3	5	10	15	20	25
Clapage	2.8	3.0	3.5	4.0	4.5	5.1
Canon	4.5	4.7	5.2	5.8	6.3	6.8
Refoulement	3.9	4.1	4.6	5.1	5.6	6.1

:

A. Coût du rechargement de la barre externe

Les coûts du rechargement de la barre externe qui nécessite la mise en place d'une canalisation de refoulement sont donnés pour les trois hypothèses dans le tableau ci-dessous en fonction de la distance entre la zone de prélèvement et de dépôt. :

Coût du rechargement de la barre externe

Hypothèses	Frais fixes (€ HT)	Volume (m ³)	Montant total (€HT) en fonction distance dragage - dépôt					
			3 km	5km	10 km	15 km	20 km	25 km
H1 (1 000m rech.)	1 500 000	145 000	2 065 518	2 095 134	2 169 174	2 243 214	2 317 254	2 391 294
H 2 (2 000 m rech.)	1 500 000	290 000	2 631 036	2 690 268	2 838 348	2 986 428	3 134 508	3 282 588
H 3 (3 000 m rech.)	1 500 000	435 000	3 196 553	3 285 401	3 507 521	3 729 642	3 951 762	4 173 882

Ce qui conduit au prix moyen au m³ (tout compris) mis en place suivants :

Rechargement de la barre externe - Prix moyen du m³ (€HT)

Hypothèses	Prix moyen du m ³ (€HT) en fonction distance dragage - dépôt					
	3 km	5km	10 km	15 km	20 km	25 km
H1 (1 000m rech.)	14,2	14,4	15,0	15,5	16,0	16,5
H 2 (2 000 m rech.)	9,1	9,3	9,8	10,3	10,8	11,3
H 3 (3 000 m rech.)	7,3	7,6	8,1	8,6	9,1	9,6

B. Coût du rechargement de la barre surnuméraire

Les coûts du rechargement de la barre externe sont donnés pour les trois hypothèses dans le tableau ci-dessous en fonction de la distance entre la zone de prélèvement et de dépôt.

Coût du rechargement de la barre surnuméraire

Hypothèses	Frais fixes (€ HT)	Volume (m3)	Montant total (€HT) en fonction distance dragage - dépôt					
			3 km	5km	10 km	15 km	20 km	25 km
H1 (1 000m rech.)	500 000	290 000	1 313 848	1 373 080	1 521 160	1 669 240	1 817 320	1 965 400
H 2 (2 000 m rech.)	500 000	580 000	2 127 696	2 246 160	2 542 320	2 838 480	3 134 641	3 430 801
H 3 (3 000 m rech.)	500 000	870 000	2 941 544	3 119 240	3 563 480	4 007 721	4 451 961	4 896 201

Ce qui conduit au prix moyen au m3 (tout compris) mis en place suivants :

Rechargement de la barre surnuméraire - Prix moyen du m3 (€HT)

Hypothèses	Prix moyen du m3 (€HT) en fonction distance dragage - dépôt					
	3 km	5km	10 km	15 km	20 km	25 km
H1 (1 000m rech.)	4,5	4,7	5,2	5,8	6,3	6,8
H 2 (2 000 m rech.)	3,7	3,9	4,4	4,9	5,4	5,9
H 3 (3 000 m rech.)	3,4	3,6	4,1	4,6	5,1	5,6

C. Coût du rechargement de la barre externe et de la barre surnuméraire

Les coûts du rechargement de la barre externe et de la barre surnuméraire au cours d'une même opération sont donnés pour les trois hypothèses dans le tableau ci-dessous en fonction de la distance entre la zone de prélèvement et de dépôt

Coût du rechargement de la barre externe et de la barre surnuméraire

Hypothèses	Frais fixes (€ HT)	Volume (m3) barre interne	Volume (m3) barre externe	Montant total (€HT) en fonction distance dragage - dépôt					
				3 km	5km	10 km	15 km	20 km	25 km
H1 (1000m rech.)	1 500 000	145 000	290 000	2 879 366	2 968 214	3 190 334	3 412 454	3 634 574	3 856 694
H 2 (2 000 m rech.)	1 500 000	290 000	580 000	4 258 732	4 436 428	4 880 668	5 324 908	5 769 148	6 213 388
H 3 (3 000 m rech.)	1 500 000	435 000	870 000	5 638 097	5 904 642	6 571 002	7 237 362	7 903 722	8 570 083

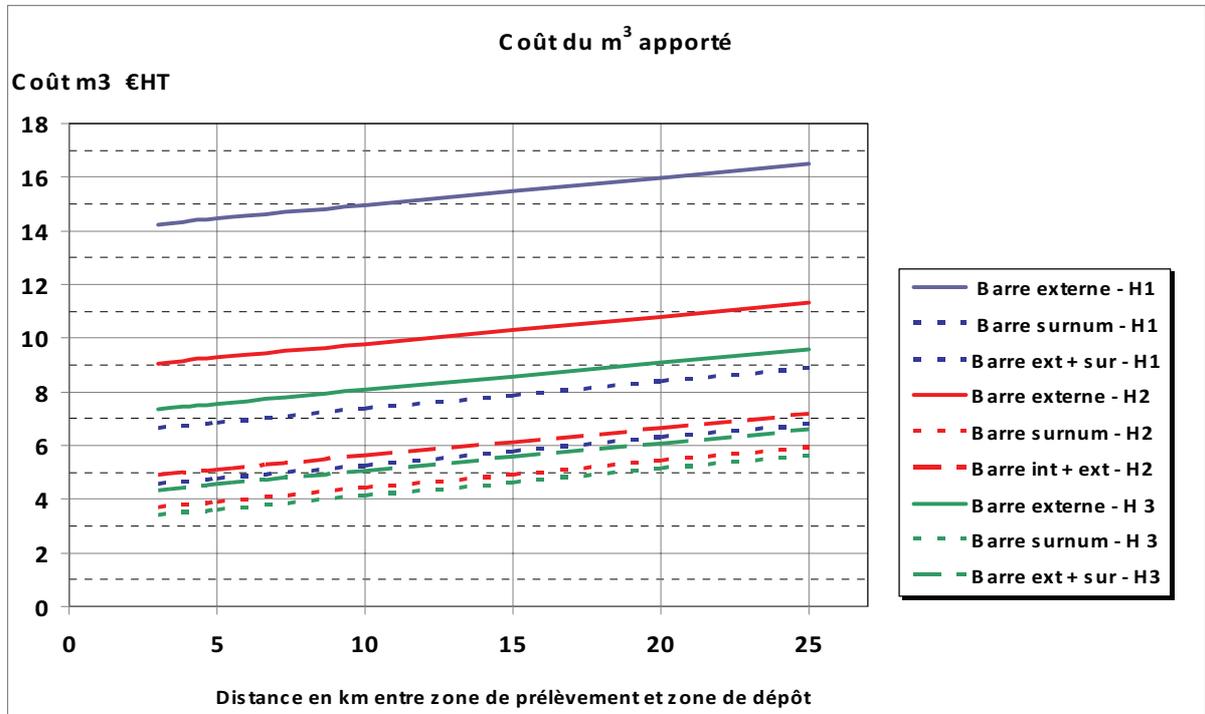
Ce qui conduit au prix moyen au m3 (tout compris) mis en place suivants :

Rechargement de la barre externe et de la barre surnuméraire - Prix moyen du m3 (€HT)

Hypothèses	Prix moyen du m3 (€HT) en fonction distance dragage - dépôt					
	3 km	5km	10 km	15 km	20 km	25 km
H1 (1 000m rech.)	6,6	6,8	7,3	7,8	8,4	8,9
H 2 (2 000 m rech.)	4,9	5,1	5,6	6,1	6,6	7,1
H 3 (3 000 m rech.)	4,3	4,5	5,0	5,5	6,1	6,6

D. Conclusion

Le graphe ci-dessus résume le coût du m³ apporté pour les 3 hypothèses et des distances de prélèvement variant de 3 à 25 km.



Il apparaît que :

- Le rechargement de la barre externe nécessite la mise d'une canalisation, qui induit des frais fixes importants, ainsi pour avoir un prix au m³ moyen (montant total / volume mis en place) intéressant il faut mettre en place des volumes importants c'est-à-dire traiter un linéaire de littoral important. Pour un linéaire de 3 000 m, le prix moyen du m³ reste supérieur à 7,3 €HT / m³.
- Le rechargement de la barre surnuméraire qui peut se faire par clapage, induit d'une part moins de frais fixes et d'autre part est plus rapide ce qui conduit à des prix au m³ moyen de 3,4 €HT / m³ pour 3 000 m rechargés soit un peu moins de deux fois que le prix du même m³ mis sur la barre externe.
- Le rechargement de barres externes et la création simultanée d'une barre surnuméraire conduit à un prix moyen au m³ minimum de 4,34 €HT / m³ pour un linéaire de 3000 m rechargé.

E.5 Prélèvement dans les grandes profondeurs (Gisement BEACHMED)

Le prélèvement de sable dans le gisement marin « BEACHMED » situé au large de Montpellier à 100 km environ du site de rechargement conduit à prélever les sables dans des profondeurs importantes de dragage (80 à 100 m). Cela nécessite de mettre en œuvre une drague de grande capacité. Pour procéder à l'examen de cet apport il a été retenu une drague ayant un puits de l'ordre de 10 000 m³ c'est-à-dire capable d'apporter à chaque voyage 10 000 m³ de sable mesuré dans le puits de la drague soit compte tenu du foisonnement 8 500 m³ mesuré en place. Des dragues d'une telle capacité sont assez nombreuses (chaque entreprise internationale de dragage en possède deux ou trois) mais restent toutefois en nombre relativement limité.

Il convient de noter qu'il existe des dragues de plus grande capacité (15 000 jusqu'à 25 000 à 30 000 m³) appelées "JUMBO" (Fig. E.8) mais dont le nombre est trop limité à ce jour pour pouvoir être prise en compte.



Figure E.8 : Exemple de Drague JUMBO

Des dragues de 10 000 m³ en puits permettent de draguer, sans adaptations spéciales, jusqu'à des profondeurs de l'ordre de 40m. Elles peuvent recevoir des adaptations de l'élinde (installation d'un bossoir qui permet d'allonger l'élinde et installation de pompes submergées) qui permettent de porter la profondeur de dragage à 100m (voir figure E.9).

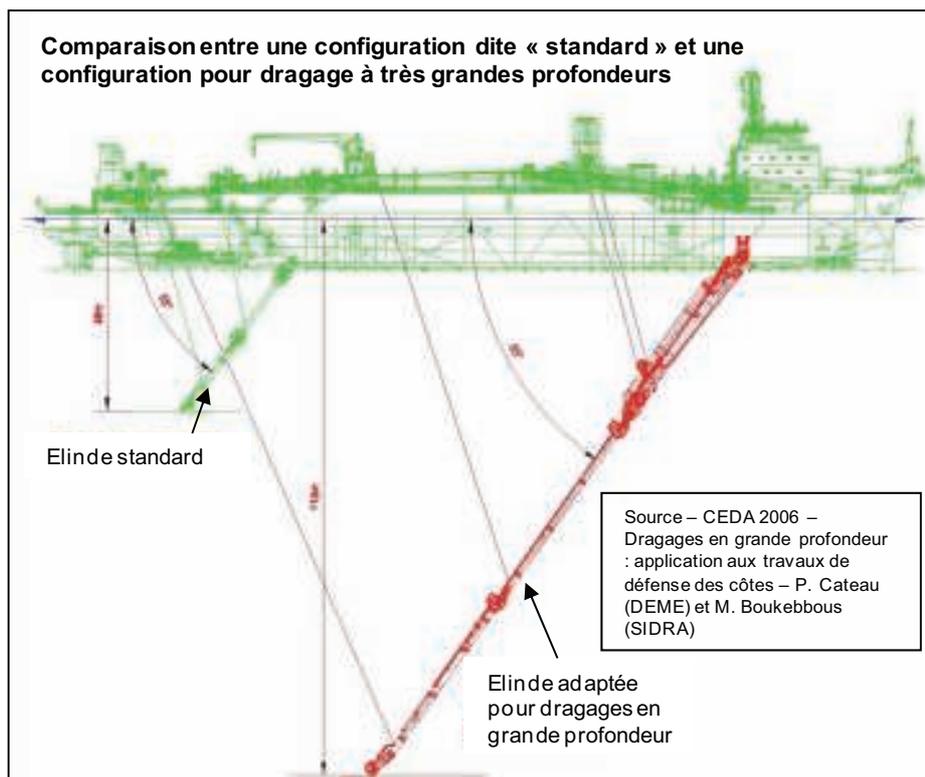


Fig. E.9 : Schéma comparatifs de type d'élindes

De telles dragues ont un tirant d'eau de l'ordre de 10 m à pleine charge, compte tenu du pied pilote et de la houle elles ne peuvent évoluer à pleine charge que dans des zones offrant des profondeurs d'au moins 12m. Elles ne pourront donc claper sur la barre surnuméraire et il sera nécessaire de mettre en place une canalisation pour recharger la barre externe et la barre surnuméraire.

La mise en oeuvre d'un tel matériel nécessite des coûts fixes importants et n'est adapté qu'à la mise en place de volumes importants. De ce fait l'estimation des coûts n'est faite que pour le rechargement simultané de la barre interne et de la barre externe et ce sur un linéaire de 3 000m soit pour un volume de 1 300 000 m³.

- Les coûts unitaires sont les suivants :
- Mobilisation et adaptation de la drague pour dragage en grande profondeur : 2 000 000 €HT,
- Canalisation fourniture, mise en place, déplacement, retrait) : 2 000 000 €HT.
- Prix de m³ dragué compte tenu de la distance : 8 € HT.

Soit pour un volume de 1 300 000 m³ un coût total de 14 400 000 €HT ce qui donne un coût moyen au m³ de 11 €HT. Ce prix de m³ est à comparer au prix de m³ mis en place avec une drague classique (puits de 3000 m³) qui pour un même rechargement est compris entre 4,3 €HT et 6,6 €HT suivant la distance de prélèvement.

E.6 Présence de fines dans la zone de prélèvement

Lors du dragage, le chargement optimal du puits de drague nécessite de pratiquer la surverse, c'est-à-dire quand le puits est plein d'une mixture eau – sédiment, de continuer le dragage afin de remplir au mieux le puits de la drague par du sable. Pendant cette opération, les eaux sont évacuées soit par un « trop plein » qui évacue ces eaux soit en surface soit sous le navire. Ces eaux qui contiennent la fraction fine du sédiment est évacuée en mer, on peut considérer que toute la fraction inférieure à 0,1 mm est évacuée en mer et ce qui va entraîner une augmentation locale de la turbidité des eaux fonction de la teneur en fines des sables dragués. Pour que les impacts soient faibles ou négligeables il faut que la fraction fine (> 0,1 mm) soit faible et de l'ordre de quelques %.

Il convient de noter que si la surverse n'est pas effectuée cela évite l'augmentation de la turbidité sur la zone de dragage mais les fines sont alors remises en suspension lors du dépôt. La non pratique de la surverse augmente de façon importante les coûts car à chaque cycle de dragage le volume de sable apporté est 15 à 20 % ce qu'il est avec la pratique de la surverse pour optimiser le chargement en sable.

Tâche F : Contrôle et suivi du projet (SIVOM de Leucate/Barcarès, Communauté d'Agglomération de Sète, Conseil Général 34, Service Maritime et de Navigation du Languedoc-Roussillon (SMNLR))

Cet accompagnement du travail scientifique passe par des réunions fréquentes et des contacts réguliers entre le responsable scientifique du projet et les gestionnaires au sens large du littoral impliqués dans le programme. Les contacts entre ces différents partenaires ont aussi lieu lors des réunions des comités de pilotage des différentes études portant sur le diagnostic de l'évolution du trait de côte en Languedoc-Roussillon.

Tâche G : Analyse des résultats. Synthèse. Recommandations. Eléments pour l'élaboration d'un guide de recommandations

Nous disposons à la fin du projet, et comme il était défini dans les objectifs et rendus du projet initial, d'un **document de synthèse bibliographique sur l'impact de rechargement d'avant-côte et sur les préconisations pour les études d'impact à venir** validé (cf. annexe), d'un document relatif à la mise au point **d'une interface de modélisation conviviale et utilisable facilement pour le modèle numérique développé par l'IMFT** (cf. annexe), et enfin d'un document de synthèse sur le **diagnostic apporté sur la faisabilité de rechargements d'avant-côte** (ce rapport). Une synthèse des principales conclusions est proposée en « 9. Synthèse et conclusions des travaux ».

6- Adéquation des résultats aux objectifs initiaux

Le programme a respecté les délais de rendus du calendrier d'exécution initialement établi (Tabl. 2). Les objectifs sont respectés et les rendus définis sont livrés comme prévus à la fin du programme (cf. dans ce rapport 1.3. Objectifs initiaux et résultats scientifiques attendus).

7- Actions de valorisation scientifique

Ce travail donne lieu à des publications dans des revues scientifiques spécialisées et des communications dans des congrès nationaux et internationaux, communes des différents partenaires (cf. annexe). Il aboutit par ailleurs à un document de référence à destination des utilisateurs potentiels de la technique et des décideurs. Un site Internet dédié au programme ainsi qu'aux programmes sur des thématiques proches est par ailleurs accessible à l'adresse suivante : <http://www.gladys-littoral.org/>

Plus concrètement, un véritable transfert s'opère vers les gestionnaires du littoral lors des nombreuses discussions durant les Comités de Pilotage dans lesquels l'UPVD, coordinateur de ce projet, intervient comme membre et expert. De nombreuses études sont en effet en cours notamment dans l'Hérault. L'attente des utilisateurs est grande et ce projet tente d'apporter le maximum d'informations pour une prise de décision sereine et réfléchie en matière de gestion intégrée de la zone côtière. Evidemment, le phasage entre les études amont, même appliquées comme ce projet, et les actions de terrain envisagées n'ont pas toujours le même rythme et on ne peut se satisfaire d'études ponctuelles. **Ce travail doit aboutir à l'élaboration d'un véritable plan de gestion sédimentaire à l'échelle du Golfe du Lion, si les rechargements de plage ou d'avant-côte figurent parmi les solutions techniques de gestion du littoral qui sont retenues.**

8- Restitution destinée aux utilisateurs précisant les produits restitués

Une synthèse de tous les résultats obtenus est réalisée dans ce rapport dans l'optique d'établir les préconisations relatives à l'utilisation de la méthode de rechargement d'avant-côte comme protection dynamique des rivages à barres, ainsi que ses limites. L'ensemble des résultats est, par ailleurs, susceptible de fournir la matière de publications et de communications dans des revues et auprès d'instances spécialisées, comme cela a déjà été initié et va se poursuivre à la suite de ce projet.

De manière plus spécifique, les gestionnaires bénéficient dès la fin du programme (1) d'un outil de modélisation, (2) d'un document de référence sur l'impact biologique des rechargements d'avant-côte, (3) un document de référence et de préconisation sur les rechargements d'avant-côte.

9- Conclusions et synthèse des travaux à la fin du projet

a. Problématique et objectifs

La carence en sédiment est à l'origine du recul de la plupart des plages sableuses. Une des méthodes de lutte contre l'érosion côtière consiste donc à remédier à ce manque par des apports de sédiments sableux artificiels, technique appelée **rechargement sédimentaire**.

Dans l'optique de tels rechargements, il paraît utile de s'interroger sur les moyens les mieux adaptés en la matière pour aboutir à une bonne gestion des stocks sableux. Les rechargements apparaissent, en effet, comme une solution alternative à des ouvrages en dur qui ont montré leurs limites en Languedoc-Roussillon, et le problème de la pauvreté des sources potentielles pouvant être utilisées encourage la prospection et la réflexion sur la meilleure utilisation possible du sédiment. Un des axes de réflexion, qui est développé dans ce travail, est de tester la possibilité d'effectuer des rechargements, non pas sur les plages comme cela est réalisé couramment, mais sur l'avant-côte, c'est-à-dire la partie sous-marine de la plage. Cette technique de rechargement d'avant-côte présente à première vue certains avantages comme la limitation du transport et du coût, la possibilité d'utiliser des sédiments plus fins que ceux qui seraient nécessaires pour la plage émergée et une limitation des nuances lors des travaux.

b. Site d'étude et cas d'étude

Les sites étudiés concernent les deux types d'environnement d'avant-côte à barres sédimentaires du golfe du Lion : Sète avec ses barres rectilignes au nord et Leucate avec ses barres festonnées au sud.

c. Travail réalisé

Le travail sur **la méthodologie de rechargement** a été réalisé par deux approches distinctes et complémentaires (1.1) en **modélisant numériquement** des rechargements d'avant-côte sur les sites du programme à l'aide du modèle 2DV Modhys, du modèle Multi 1DH Sisyphe et de la chaîne de calcul 2DH ATS. L'objectif est l'utilisation des modèles morphodynamiques numériques pour estimer l'efficacité et la durabilité d'un rechargement effectué sur une avant-plage sableuse. Plusieurs types de rechargement sont envisagés, 1) le rechargement des barres sédimentaires externes, 2) la création d'une barre surnuméraire au large. On a fait le choix volontairement de choisir de gros volumes de rechargement Comme la majorité de l'érosion de la côte survient lors d'une tempête, l'étude numérique se fait à l'échelle typique d'une tempête qui est de l'ordre d'une journée mais les avancées techniques permises par ce programme ont aussi abouties à la réalisation de simulations à plus long terme. (1.2) Des simulations de rechargements d'avant-côte **en modèle physique** viennent compléter cette approche numérique. Pour les modèles numériques, si les scénarios d'érosion sont assez bien reproduits, les phases où le transport de sédiment s'effectue en direction de la côte sont en général assez mal simulées. Il est donc intéressant de coupler approche par modèle numérique et physique, capables de reproduire les phases d'accrétion. Les études expérimentales sur modèle réduit 2D, ici un canal de 36m équipé d'un batteur générant une houle irrégulière, sont

en effet une alternative précieuse et peu employée. Compte-tenu des dimensions du canal, le choix d'une échelle géométrique d'environ 1/10 permet de reproduire le milieu naturel à échelle réduite (canal de longueur 40m et profondeur d'eau 50cm pour le respect des échelles).

Par ailleurs une analyse des **impacts sur le benthos** des rechargements d'avant-côte est réalisée, ainsi que **sa faisabilité technique**.

d. Résultats

1. L'impact sur le benthos

On peut considérer que **l'impact immédiat des rechargements sur les peuplements benthiques des petits fonds sableux est important (mortalité forte), mais qu'au regard de la faible diversité naturelle des milieux et d'une recolonisation rapide des sites, l'impact à plus long terme est relativement réduit**. Le problème se pose davantage pour les espèces commerciales comme les donax (*Donax trunculus*) qui sont exploitées par les pêcheurs à pieds.

A partir de l'expérience menée dans ce travail, une proposition d'une **methodologie adaptée d'évaluation des impacts des rechargements sous-marins sur les populations benthiques** est réalisée dans le document complet en annexe. Il faut s'y reporter pour en prendre connaissance dans le détail, la proposition de la methodologie globale étant axée sur la description des travaux de dragage et de rechargement et celle des milieux, notamment l'établissement du profil biologique.

2. Les modèles numériques

Les trois modèles utilisés sont globalement convergents. **Le site de Sète semble bénéficier plus favorablement des rechargements. Le rôle de rechargements par création de barres surnuméraires au large est jugé moins concluant; la plus grande efficacité revenant aux rechargements de barres externes pour des conditions de tempête classique. Le fait de créer une troisième barre surnuméraire au large n'a pas que peu d'effet sauf lors des phases de tempête exceptionnelle**. Les modèles numériques restent peu performants pour reproduire la remontée de sédiment vers la plage. La prise en compte d'une meilleure discrétisation des tempêtes reste à faire, ainsi que l'extension de ces modèles vers des simulations moyen terme saisonnières.

3. Le modèle physique

A partir de l'obtention d'un profil d'équilibre et en respectant les conditions de similitudes avec le milieu naturel, on a procédé à plusieurs rechargements. La première expérience avait pour but de tester un rechargement sur le revers de la barre interne ; puis un changement d'échelle a été réalisé pour réaliser des rechargements plus au large (barre externe, fosse externe et à nouveau la zone interne) avec une meilleure discrétisation de la tempête, en particulier le tombant. Les conclusions ont été encourageantes et démontrent la **bonne efficacité** des rechargements d'avant-côte du point de vue expérimental du moment que l'on simule bien **la phase de tombant de tempête**. C'est lors de cette phase que la plage récupère ce qu'elle a perdue pendant le montant avec un bilan final qui peut s'avérer positif. En effet, **l'effet de brisance et de source en sédiment** pour la plage est avéré pour toutes les expériences du moment que l'on reproduit correctement la tempête.

4. L'estimation des coûts

Le rechargement de la barre externe qui semble le plus efficace nécessite des moyens de mise en œuvre plus lourds que le rechargement surnuméraire au large (estimation à 7,3 contre 3,4 EHT/m³ pour un linéaire rechargé de 3km). Pour rendre cette méthodologie attractive, il faut donc réaliser des rechargements importants en volume.

e. Discussion

Les modèles numériques restent très sensibles à la forme du profil initial. On observe des difficultés à modéliser l'évolution de la plage émergée. Le choix de simuler uniquement une tempête de 24 h avec une hauteur de houle constante reste finalement très discutable en comparaison de ce qui a pu être vu pour le canal lors de la phase de tombant de tempête et lors des simulations plus long terme réalisées.

Les bons résultats obtenus en canal souligne le problème des mesures en nature avant et après tempête, alors qu'il est avéré que c'est le ratio entre montant et tombant qui va définir l'impact de la tempête.

Les divergences observées entre modèles numériques et modèle physique tiennent dans la formulation même des modèles numériques et leur façon de prendre en compte les tempêtes. Cela confirme l'intérêt de la volonté de départ de vouloir confronter ces deux approches complémentaires. Un travail reste à mener pour confronter ces deux approches en faisant tourner les modèles numériques sur les observations faites en canal.

Il paraît aussi nécessaire de travailler en canal à l'échelle 1/1 pour contrôler que le changement d'échelle ne crée pas un biais dans les résultats.

f. Conclusion

Des avancées notables sur l'effet des rechargements d'avant-côte ont pu être obtenues grâce aux efforts de modélisations entrepris dans ce programme. L'impact sur le benthos et sa capacité de recolonisation, l'efficacité des rechargements de barre externe, l'apport de la modélisation physique en sont des éléments importants. Les résultats permettent de définir les futurs axes de recherche sur cette problématique.

10-Perspectives

- Les modèles numériques restent un outil indispensable pour la prise de décision, même si des améliorations, notamment pour l'accrétion, sont à apporter pour ces cas appliqués complexes. Le canal a lui aussi montré son intérêt alors qu'il était peu utilisé jusqu'à présent.
- Malgré les rechargements d'avant-côte simulés numériquement, l'énergie de la houle à la côte reste importante dans le système interne, ce qui amène à penser que cette solution doit être accompagnée par du rechargement de plage et mettre en place des volumes de rechargement importants.
- Il s'avère nécessaire de toujours essayer de croiser les sources d'information dans la prise de décision.
- Il reste à continuer d'améliorer les modèles numériques et de réaliser des simulations sur le plus long terme avec des situations météorologiques simplifiées mais représentatives afin de se rapprocher des conditions *in situ* pour en faire un outil le plus fiable possible.

- Pour mettre en place une politique de rechargements à l'échelle régionale, il semble indispensable de créer des plans de gestions des sédiments par cellule hydro-sédimentaire en incluant les bassins versants et en recensant l'ensemble des volumes à recharger et l'ensemble des volumes disponibles.
- De nouvelles pistes doivent être suivies pour fournir des sédiments à recharger comme l'apport complémentaire de coquilles déjà présente en grand nombre sous forme de débris dans les sédiments de plage. Les résidus de l'exploitation conchylicole pourraient y trouver un débouché.
- Il serait maintenant intéressant de pouvoir bénéficier d'un rechargement d'avant-côte grandeur nature et de réaliser un suivi in situ de son efficacité.
- La problématique des rechargements pour limiter les effets de l'érosion et maintenir les infrastructures littorales en l'état ne doit pas faire oublier qu'il pourrait s'avérer moins coûteux sur le long terme pour la société de prendre la décision de reculer ces infrastructures. Cette méthode, appelée « recul stratégique », est déjà appliquée dans certains pays comme le Canada (Québec). Toutes les études à venir d'aménagement pour lutter contre l'érosion et la submersion devraient être accompagnées d'un volet d'analyse économique « coût/bénéfice » pour chacune des solutions proposées en incluant systématique le recul stratégique et en se basant sur des prévisions à 30 ans. Cette approche se révélera encore plus utile quand on pourra inclure les prévisions de scénarios de changements climatiques à venir, qui affecteront sûrement la dynamique sédimentaire en accentuant encore les phénomènes d'aléas sur le littoral.

Bibliographie

- ADLOFF, F., 2007. Hydrodynamique de la zone de déferlement d'un système de barres d'avant-côte festonnées. *Rapport de stage M2R*, 35p.
- BAILARD J.A., 1981, An energetic total load sediment transport model for a plane sloping beach, *Journal of Geophysical Research*, vol.86 C11 pp. 10938-10954.
- BATTJES ET JANSSEN, 1978. Energy loss and set-up due to breaking random waves. *Proceedings 16th International Conference of Coastal Engineering*. ASCE, 569-587.
- BENEDET, L., FINKL, C.W., CAMPBELL, T. AND KLEIN, A., 2004. Predicting the effect of beach nourishment and cross-shore sediment variation on beach morphodynamic assessment. *Coastal Engineering*, 51, 839-861.
- CAMENEN B. AND LARROUDÉ PH., 2003. Comparison of sediment transport formulae for a coastal environment, *Journal of Coastal Engineering*, 48, pp. 111-132.
- CAMENEN B. AND LARROUDÉ PH., 2003b. Un modèle morphologique côtier pour la création de barres rythmiques, *Revue française de génie civil, Génie côtier*, vol. 7, pp. 1099-1116, 2003.
- CAPOBIANCO, H. HANSON, M. LARSON, H. STEETZEL, M.J.F. STIVE, Y. CHATELUS, S. AARNINKHOF AND T. KARAMBAS, 2002. Nourishment design and evaluation: applicability of model concepts, *Coastal Engineering* 47 (2), pp. 113-135
- CERTAIN, R. AND BARUSSEAU, J.P., 2005. Conceptual modelling of sand bars morphodynamics for a microtidal beach (Sète, France). *Bull. Soc. Géol. De France*, t.176, n°4, pp. 343-354.
- DEAN R.G. & DALRYMPLE R.A., 1984. *Water Wave Mechanics for Engineers and Scientists*, World Scientific.
- DETTE H.H., M. LARSON, J. MURPHY, J. NEWE, K. PETERS, A. RENIERS, H. STEETZEL, 2002. Application of prototype flume tests for beach nourishment. *Coastal Engineering* 47, 137-177.
- FERRER, P., CERTAIN, R., ET BARUSSEAU, J.-P., 2009. *Conceptual modelling of a double crescentic barred coast (Leucate-Plage, France)*. Coastal Dynamics, Tokyo, Japon (7-11 Septembre 2009).
- GUNAYDIN, K., KABDASLI, M. S., 2003. Characteristics of coastal erosion geometry under regular and irregular waves. *Ocean Eng.* 30 1579-1593.
- GUILLEN, J. & HOEKSTRA, P., 1997. Sediment distribution in the nearshore zone: grain size evolution in response to shoreface nourishment (island of Therschelling, The Netherlands)
- GRUNNET, N.M. AND RUESSINK, B.G., 2005. Morphodynamic response of nearshore bars to a shoreface nourishment. *Coastal Engineering*, 52(2), 119-137.
- GRUNNET N.M. AND HOEKSTRA , 2004. Alongshore variability of the multiple barred coast of Therschelling, The Netherlands, *Marine Geology* 203 , pp. 23-41.
- HAMM, L., Capobianco, M., Dette, H.H., Lechuga, A., Spanhoff, R., Stive, M.J.F, 2002. A summary of European experience with shore nourishment, *Coastal Engineering*, 47, 237-264.
- HASSELMAN, K., BARNETT, T.P., BOUWS, E., 1993. Measurements of wind-wave growth and swell decay during the Joint North Sea Wave Project (JONSWAP). *Deutsches Hydrographisches Institut, Hamburg, Reihe A* (8), 12, 95 pp.
- HOEFEL F. & S. ELGAR, 2003. Wave-induced sediment transport and sand migration, *Science*, 299, 1885-1887

- HOEKSTRA, P. & HOWMAN, K.T., 1997. Selective sediment transport in the nearshore zone: field observations and potential mechanisms, *Proceedings Coastal Dynamics 1997*, ASCE New York.
- IMAGES/CG34, 2008. Rapports finaux Beachmed-e sous-projet GESA phase A, B et C, programme Européen Interreg IIIC.
- KROON, A., HOEKSTRA, P., HOUWMAN, K. & RUESSINK, G., 1994. Morphological monitoring of a shoreface nourishment NOURTEC Experiment at Terschelling, The Netherlands. *Proceedings Coastal Engineering 1994*, 2223-2236.
- KRIEBEL D.L. & DEAN R.G., 1985. Numerical simulation of time-dependent beach and dune erosion. *Coastal Engineering* 9:33, 221-245.
- LEGEM/MEDD, 2004. Etude de faisabilité pour l'utilisation des barres sédimentaires d'avant-côte dans la lutte contre l'érosion côtière. Rapport final de recherche : 142 p.
- LNHE-CHATOU, 2002. Artemis - modelisation system of Telemac, version 5.2 – user-validation manual, *Technical report*, edf-gdf
- LNHE-CHATOU, 2002. Telemac2d - modelisation system of Telemac, version 5.2 – user-validation manual, *Technical report*, edf-gdf
- LNHE-CHATOU, 2002. Sisyphe - modelisation system of Telemac, version 5.2 – user-validation manual, *Technical report*, edf-gdf
- LONGUET HIGGINS M..S., 1970. Longshore currents generated by obliquely incident sea waves, *Journal of geophysical research*, vol 75, n°33, pp. 60778-60801
- MASSELINK, G., AUGER, N., RUSSEL, P. AND O'HARE, T., 2007. Short-term morphological change and sediment dynamics in the intertidal zone of a macrotidal beach. *Sedimentology*, 54, 39-53.
- NAIRN R.B., ROELVINK J.A. & SOUTHGATE H.N., 1990. Transition zone width and implications for modelling surf zone hydrodynamics, *Proc. 22nd Int. Coastal Eng. Conf.*, Delft, ASCE.
- NOURTEC, 1997. Innovative Nourishment Techniques Evaluation- *Final Report*. Coord. Rijkwaterstaat, National Institute of Coastal and Marine Management/ RIKZ, The Hague, The Netherlands, 105 pp with figures.
- PLANT N.G., RUESSINK B.G. & WIJNBERG K.M. (2001) Morphological properties derived from a simple cross-shore sediment transport model, *J. Geophys. Res.*, 106(C1), 945-958.
- RIBAS PRATS, F. (2004). *On the growth of nearshore sand bars as instability processes of equilibrium beach states*. PhD, Departamento de Física Aplicada, UPC
- SPIELMANN K., 2002. *Modélisation de la dynamique morphologique d'un profil de plage*, Thèse de doctorat, Université de la Méditerranée, 270 pp.
- SPIELMANN K., ASTRUC D. ET THUAL O., 2001. Modélisation de la morphodynamique d'un profil de plage, *Compte Rendu de l'Académie des Sciences*, Vol. 333, p. 669-675.
- SPIELMANN K., ASTRUC D. ET THUAL O., 2004. Analysis of some key parametrizations in a beach profile morphodynamical model, *Coastal Engineering*, Vol 51, pp. 1021-1049.
- SVENDSEN I.A. 1984. Mass flux and undertow in the surf zone, *Coastal . Eng.* , 8, pp. 347-365.
- STIVE ET DE VRIEND, 1995. Modelling shoreface profile evolution. *Marine Geology*, 126, 235-248.
- VAN DUIN, M.J.P., WIERSMA, N.R., WALSTRA, D.J.R., VAN RIJN, L.C. AND STIVE, M.J.F, 2004. Nourishing the shoreface: observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands. *Coastal Engineering*, 51(8-9), 813-837.