

ETUDE DE FAISABILITE PAR MODELISATION NUMERIQUE ET CANAL A SEDIMENT DE RECHARGEMENTS SEDIMENTAIRES SABLEUX D'AVANT-COTE EN MILIEU MICROTIDAL, UNE NOUVELLE METHODE DE LUTTE CONTRE L'EROSION COTIERE

**Raphaël CERTAIN¹, Florent GRASSO³, Karine SPIELMAN²,
Dominique ASTRUC², Philippe LARROUDE³, Hervé MICHALLET³, Eric
BARTHELEMY³, François SABATIER⁴, Jean-Paul BARUSSEAU¹**

¹Université de Perpignan Via Domitia, E.A. 3678 IMAGES, 52 av P. Alduy,
66860 Perpignan Cedex, France (certain@univ-perp.fr)

²Institut de Mécanique des Fluides de Toulouse (IMFT), UMR 5502
CNRS/INPT/UPS, Allée du Pr. Soula, 31400 Toulouse, France.

³Laboratoire des Ecoulements Géophysiques & Industriels (LEGI), UMR CNRS
5519, BP 53 38041 Grenoble Cedex 9

⁴CEREGE, Europôle Méditerranéen de l'Arbois, 13545 Aix en Provence, France

Résumé :

Une des méthodes de restauration de plage les plus courantes consiste à recharger la plage émergée en sable, procédé toutefois pénalisé par la limitation des sources de sable disponibles et par des contraintes fortes pesant sur le respect des critères granulométriques. Le matériel sableux à disposition a souvent une granulométrie trop faible par rapport au matériel *in situ*, ce qui le rend très instable. L'idée vient alors de prélever ce sédiment en mer et de recharger directement dans les petits fonds ayant une granulométrie plus compatible. Les résultats obtenus pour deux programmes en cours actuellement, LITEAU II (MEDAD) et GESA Beachmed-e (Programme européen Interreg III C), sont présentés ici. Ils étudient un certain nombre de scénarios de rechargements d'avant-côte à l'aide de plusieurs modèles numériques complémentaires et de simulations en canal à sédiment.

Abstract:

One way to recover beaches consists in beach nourishment. Sometimes the grain size of the borrow sand is however too thin to be in equilibrium on the beach. A solution can be to make shoreface nourishment, where sand is generally thinner.

The results of two programs LITEAU II (MEDAD) and GESA Beachmed-e (European Program) are presented here. Several scenarios of shoreface nourishments in a microtidal environment are tested by numerical and physical modelling.

Mots clés :

Rechargement sédimentaire d'avant-côte, modélisation numérique, modélisation physique, érosion côtière, barres sédimentaires d'avant-côte.

1. Introduction

Les communes littorales méditerranéennes 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.

Les rechargements classiques en sable réalisés sur la plage émergée sont une des techniques de lutte mais le matériel sableux à disposition a souvent une granulométrie trop faible par rapport au matériel *in situ*. Prélever ce sédiment en mer et recharger directement dans les petits fonds ayant une granulométrie fine plus compatible peut être une alternative.

Cette technique a pu être testée sur certains littoraux mésotidaux (Burke *et al.*, 1991 ; Basinski & Szmytkiewicz, 1991 ; Foster *et al.*, 1994). Le programme européen Nourtec (MAST-II) reste à ce jour le plus ambitieux (NOURTEC, 1997). Les résultats ont été encourageants puisque le sédiment a été remonté vers la côte et a pu bénéficier à la plage (Hoekstra *et al.*, 1996). Cette expérience concluante a amené les autorités hollandaises à commanditer une quinzaine de rechargements d'avant-côte depuis 1997 (Spanhoff *et al.*, 2003).

Peu de modèles numériques 2DV, 2DH et 3D ont déjà été mis en oeuvre pour modéliser le comportement des rechargements des barres et/ou creux d'avant-côte (Van Duin *et al.*, 2004 ; Grunnet *et al.*, 2005). Les résultats ont montré l'utilité de ces modèles, bien que des améliorations soient nécessaires.

En milieu microtidal, aucune étude préalable n'a pour l'instant été menée. Deux programmes en cours actuellement LITEAU II (MEDAD) et GESA Beachmed-e (Programme européen Interreg III C) étudient un certain nombre de scénarios de rechargements d'avant-côte à l'aide de plusieurs modèles numériques complémentaires et de simulations en canal à sédiment. La faisabilité de tels rechargements sur différentes avant-côtes microtidales est testée. Des scénarios impliquant des volumes sédimentaires différents ainsi que différentes conditions de forçage caractéristiques de la zone sont simulés. Les auteurs présenteront ici

les résultats techniques finaux obtenus pour GESA Beachmed-e et de mi-parcours pour le programme LITEAU II.

2. Site d'étude et méthodologie

2.1 Sites d'étude

Notre choix s'est porté sur six sites qui subissent des érosions diverses et qui sont représentatifs de l'ensemble des avant-côtes menacées du Languedoc-Roussillon : la plage de la Corniche à Sète, ainsi que celles de Vendres, Ingril, Maguelonne et Petit-Travers (Hérault) ; plus au sud celle de Leucate (Aude).

2.2 Méthodologie pour la modélisation numérique

Les modèles qui sont utilisés dans cette étude sont les suivants.

Le code numérique 2DV MODHYS a été développé au sein de l'IMFT (Spielmann, 2002) pour analyser les bénéfices que l'on pourrait retirer d'une modification des profils de plage barrée vis-à-vis de l'érosion littorale. Ce modèle permet de prédire l'évolution à court et moyen terme d'un profil de plage (24 h dans ce travail), essentiellement dans des conditions hydrodynamiques de moyenne et de forte houle.

En utilisant le code de calcul Telemac, les modifications apportées par le LEGI ont consisté en la mise en place d'une procédure quasi-permanente liant les calculs de houle, d'hydrodynamique et de transport sédimentaire. 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.

Le modèle 2DV S-Beach est un modèle à vocation appliquée qui permet lui aussi de répondre aux attentes du projet. C'est un logiciel qui calcule les transformations d'un profil topo-bathymétrique, en fonction des conditions de houle au large.

Sur les six profils naturels retenus, des rechargements ont été « effectués » soit 1) au niveau de la barre externe (Fig. 1), soit 2) en créant une barre surnuméraire au large. On a fait le choix volontairement de choisir de gros volumes de rechargement. Les conditions de houle imposées ont été déduites de l'analyse des données décennales qui ont permis de déduire des scénarios types (Tabl. 1).

2.3 Méthodologie pour le modèle physique

Le LEGI a développé depuis quelques années une modélisation physique dans un canal de 36m (hauteur d'eau de 55,3 cm) équipé d'un batteur générant une houle irrégulière.

L'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.

La stratégie retenue consiste, une fois un profil d'équilibre barré obtenu, à réaliser une série de rechargements en étudiant le devenir du matériel rajouté.

Tableau 1: Les trois scénarios de forçage hydrodynamique retenus.

	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 s

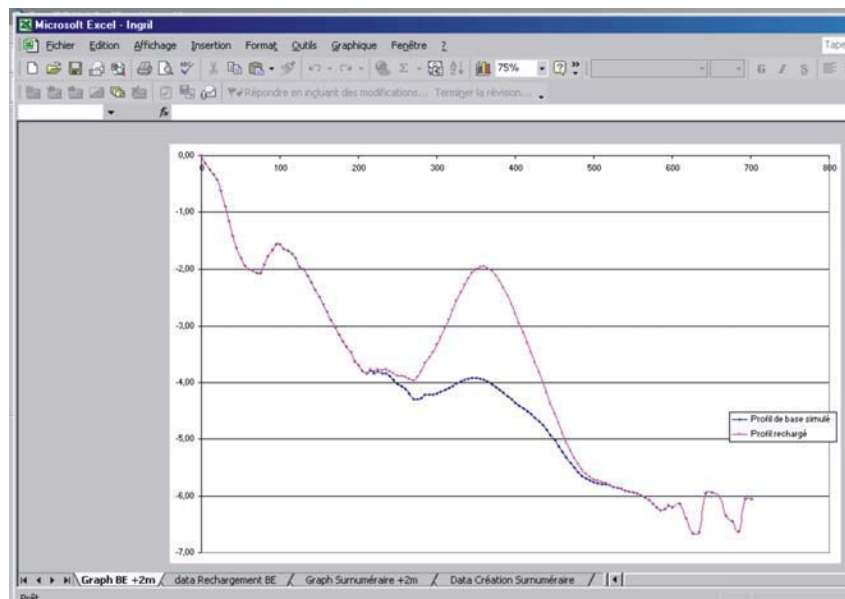


FIG. 1: Exemple de rechargement d'avant-côte pour Ingril avec représentation d'un onglet de graphique correspondant. En bleu le profil naturel ; en rose le profil rechargé qui fera l'objet de modélisation.

3. Résultats

Les résultats des simulations numériques et physiques diffèrent notablement. Ils seront présentés séparément puis une synthèse/discussion sera réalisée à partir des conclusions.

3.1 Les modèles numériques

3.1.1 Modhys

La figure 2 présente un exemple de résultats obtenus à l'aide de Modhys pour un cas de rechargement surnuméraire. On constate que malgré la réalisation du rechargement au large, la barre interne subit une érosion notable et que l'énergie incidente arrivant à la plage est importante.

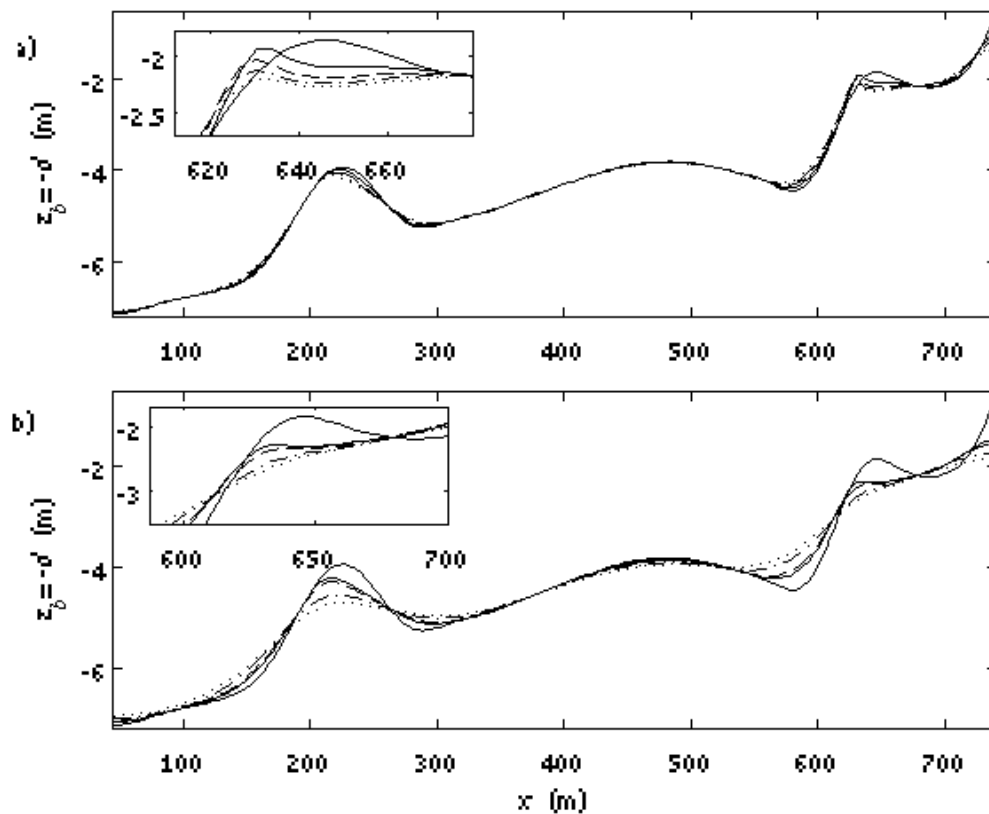


FIG. 2 : Evolution à Sète du profil de bathymétrie à 3 barres (—) pour différentes heures à partir du début d'une tempête classique : (a) (—) t=1h, (- -) t=2h, (-·-) t=3h, (···) t=4h, (b) (—) t=6h, (- -) t=8h, (-·-) t=16h, (···) t=24h.

Dans l'ensemble, 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 peut aussi noter 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 (le rechargement surnuméraire apparaît comme un bonne solution pour Petit-Travers par exemple). Il apparaît dès lors que toute généralisation est difficile et que chaque cas reste un cas d'étude particulier.

3.1.2 S-Beach

Les résultats sont ici illustrés pour la plage du Petit-Travers. On observe sur ce profil une diminution assez importante de la perte de sable pour la plage grâce au rechargement sur la barre externe et aucun changement pour le rechargement surnuméraire. De surcroît, la barre externe réapprovisionnée a atténué le recul du rivage contrairement au profil avec rechargement surnuméraire (Figs. 3 et 4). Par conséquent pour ce site, le rechargement sur barre externe peut être une solution alternative pour atténuer l'érosion de cette plage pendant des événements extrêmes.

En conclusion pour ce modèle qui permet de bien prendre en compte l'évolution de la plage émergée, le rechargement sur la barre externe semble être plus efficace que le rechargement surnuméraire sur tous les profils mais ne permet une diminution de l'érosion par rapport au profil initial que sur deux avant-côtes, Maguelonne et Petit-Travers. Ces spécificités par rapport aux conditions des profils initiaux de plage sont identiques à ce qui avait été diagnostiqué par le modèle Modhys.

Il semble par ailleurs que les temps des simulations ne soient pas assez longs, notamment en situation de tombant de tempête, pour voir des évolutions positives pour la berme de la plage, ce qui est pourtant observé en nature.

3.1.3 Télémac

Le modèle Télémac utilisé pour des tempêtes de 24 h avec Hs constante montre globalement les mêmes types de conclusion que les deux précédents modèles. Cependant, la situation diffère si on élargit l'échelle de temps considérée, et qu'on rallonge notablement la durée de la phase de tombant de tempête (Fig. 5).

En opposition, on remarque alors que le rechargement surnuméraire évolue peu mais que la tendance de la barre interne est à la migration vers la côte, l'érosion de la plage étant par ailleurs atténuée. On montre finalement avec TELEMAC que

pour des situations de simulations sur des temps plus longs (10j) en situation de tombant de tempête ou de petites houles pour une création de barre surnuméraire, les conclusions sont beaucoup plus nuancées. Les résultats apparaissent plus favorables et plus en similitude avec ce qui a pour l'instant été observé en milieu naturel et en canal à sédiment.

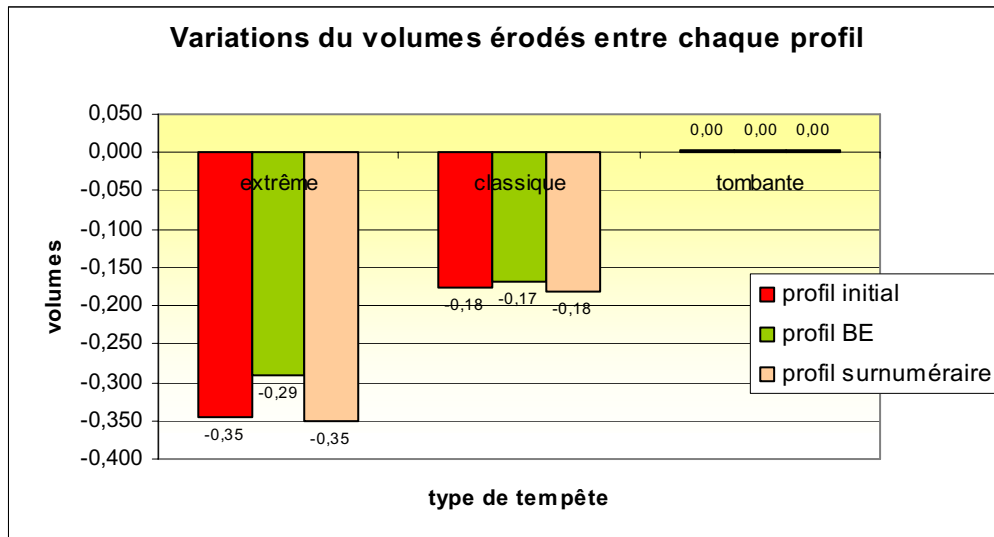


FIG. 3: Variation des volumes de sables sur la plage du Petit-Travers en fonction des types de rechargement surnuméraire ou barre externe (BE)

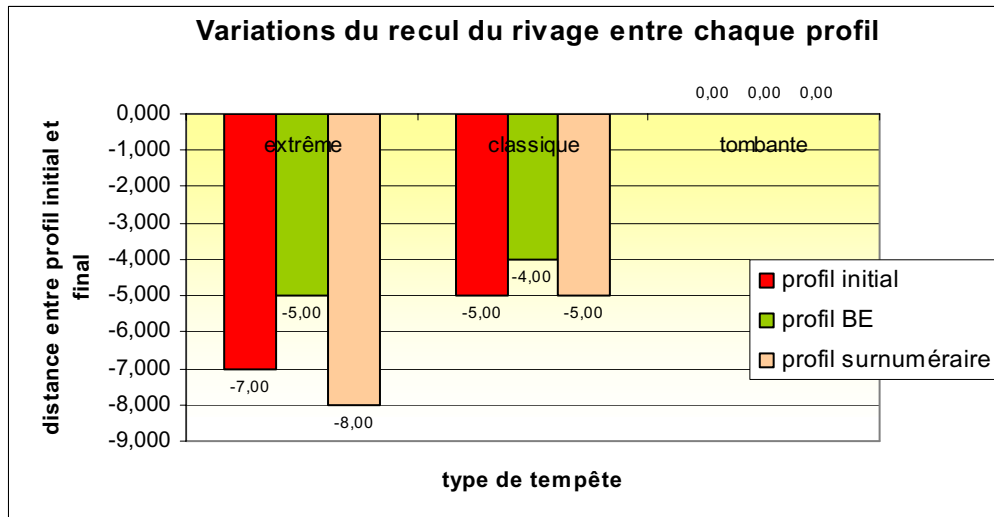


FIG. 4: Histogramme des variations du recul du rivage en fonction de chaque profil sur la plage du Petit-Travers

3.1.4 Conclusions pour la modélisation numérique

Le fait de créer une troisième barre surnuméraire au large n'a pas d'effet sauf si cette barre est suffisamment volumineuse, assez près du bord ou en position bathymétrique suffisamment haute sur le profil pour créer un déferlement de la houle. Ce qui n'était pas dans la plupart des cas élaborés et simulés.

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. Il est important de noter que ces observations sont faites pour des situations de tempêtes caractéristiques de la zone étudiée (24h) mais que les résultats diffèrent si on simule sur des temps plus longs.

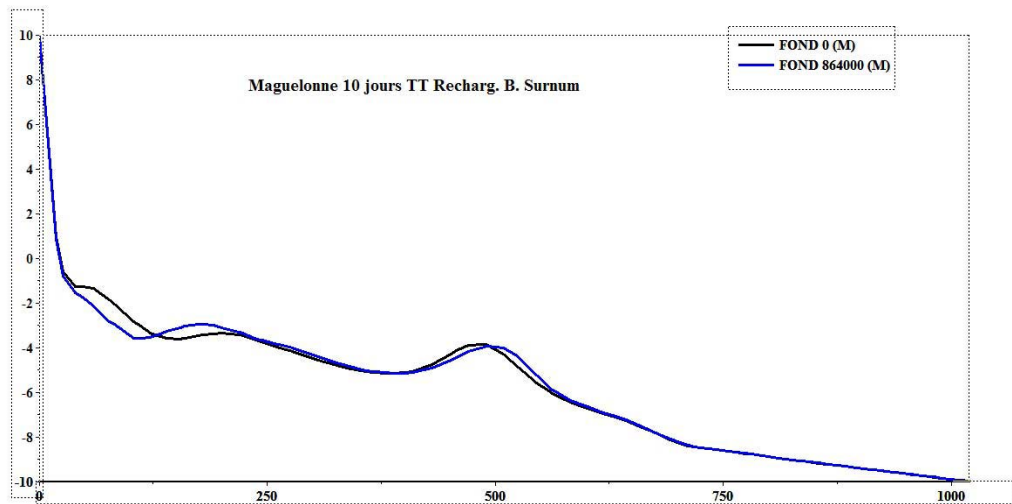


Fig. 5: Simulation à Maguelone pour un temps long de 10 jours (en noir le profil initial, en bleu le profil final) en situation de tombant de tempête.

Les simulations sur des temps plus longs (plusieurs jours) de faible agitation sont très favorables à la remontée de matériel de l'avant-côte vers la plage, comme cela a pu être observé sur les sites méso-tidaux hollandais et pour le modèle physique. Cette meilleure prise en compte du temps semble avoir une influence prépondérante sur la qualité des résultats alors que l'on pensait initialement que les problèmes survenaient des formules de transport utilisées qui ne prenaient pas assez en compte le charriage, qui joue un grand rôle dans la remontée du sédiment vers la côte.

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.

La réponse des différents profils testés n'est pas uniforme et dépend des conditions morphologiques intrinsèques du site.

Enfin, on observe des difficultés à modéliser l'évolution de la plage émergée.

3.2 Le modèle physique

3.2.1 Description des résultats

On note par exemple (figure 6) que le sédiment rechargé sur la barre externe dans des conditions de tempête classique en simulant un montant et un tombant de tempête pour des correspondances en temps réel de 10 jours participe à la construction de la barre et que du sédiment vient se placer en haut de plage en construisant une berme en fin de tempête. Il faut noter que la plage émergée est érodée durant le montant et engraisse seulement durant le tombant.

3.2.2 Conclusions pour la modélisation physique

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

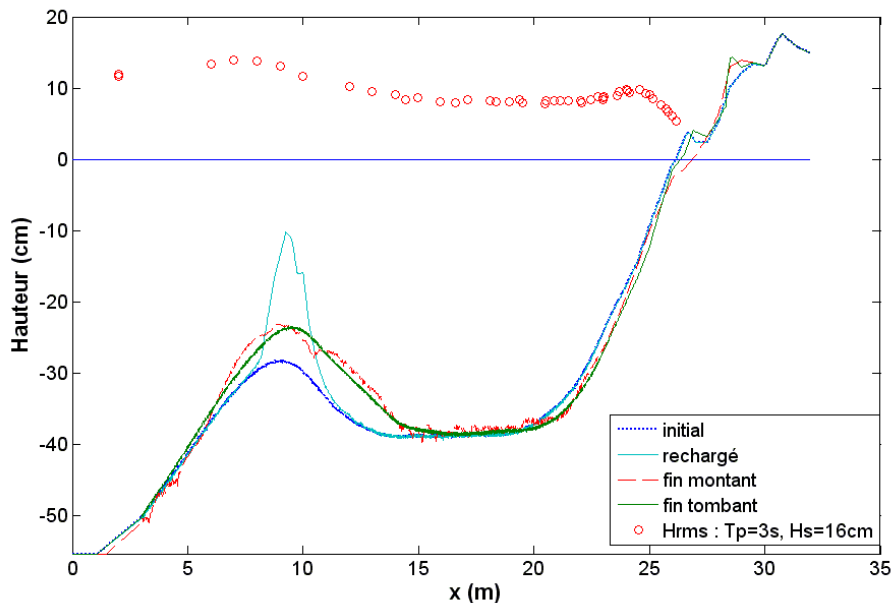


Fig. 6 : Rechargement sur la barre externe. Evolution des profils de fond et mesures des vagues de fin de montant au cours d'une tempête caractéristique.

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.

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.

4. Discussion et comparaison des deux types de modélisations

L'utilisation conjointe de modèles numérique et d'un modèle physique 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.

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 permanent). Lorsqu'on teste numériquement des simulations plus longues de faible houle, les résultats des modèles numériques convergent

vers celui des expérimentations en canal. 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.

5. Conclusion

L'utilisation de techniques scientifiques performantes s'avère une solution efficace pour l'aide au diagnostic dans les études appliquées, même si l'amélioration des modèles doit rester une priorité. Ce projet peut constituer un des outils à venir 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 paysagé minimal.

Remerciements. – Nous remercions le programme LITEAU du MEDAD qui a permis cette étude, ainsi que la communauté européenne et les gestionnaires locaux de la région Languedoc-Roussillon pour leur intérêt pour cette thématique.

6. Références bibliographiques

- ¹ BASINSKI, T., & SZMYTKIEWICZ, M., 1991. *Effectiveness of different artificial nearshore and beach nourishment technologies*. Proc. 3rd Int. Conf. On Coastal and Port Eng. In Developing Countries, Kenya, vol. 1.
- ² BURKE, C.E., MCLELLAN, T.N., & CLAUSNER, 1991. *Nearshore berms- Update of the United States Experience*. CEDA-PIANC Conference, Amsterdam, The Netherlands.
- ³ FOSTER, G.A., HEALY, T.R., & DE LANGE, W.P., 1994. *Sediment budget and equilibrium beach profiles applied to renourishment of an ebb tidal delta adjacent beach, Mt Maunganui, New zealand*. J. of Coas. Res., 10, N°3, 564-575.
- ⁴ GRUNNET, N.M., RUESSINK, B.G. AND WALSTRA, D.-J. R., 2005. *The influence of tides, wind and waves on the redistribution of nourished sediment at Terschelling, The Netherlands*. Coastal Eng., 52: 617-631.
- ⁵ HOEKSTRA, P., HOWMAN, K.T., KROON, A., RUESSINK, G., ROELVINK, J.A. & SPANOFF, R., 1996. *Morphological development of the Terchelling shoreface nourishment in response to hydrodynamic and sediment transport process*. Proceedings 25th International Conference on Coastal Engineering 1996, 2897-2909.

- ⁶ 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.
- ⁷ Spanhoff, R., Biegel, E.J., Burger, M., & Dunsbergen, D.W., 2003. *Shoreface nourishments in the Netherlands*. Proceedings of Coastal Sediment 2003.
- ⁸ Spielmann K., 2002, *Modélisation de la dynamique morphologique d'un profil de plage*, Thèse de doctorat, Univ. de la Méditerranée, 270 p.
- ⁹ Van Duin, M.J.P., Wiersma, N.R., Walstra, D.J.R., Van Rijn, L.C. & Stive, M.J.F., 2004. *Nourishing the shoreface: observations and hindcasting of the Egmond case, The Netherlands*. Coastal Eng., 51: 813-837.