



Etude morphodynamique et modélisation numérique de Sebastian Inlet, Floride, USA

Florian G. BREHIN¹, Gary A. ZARILLO¹

1. Department of Marine and Environmental Systems, Florida Institute of Technology, Melbourne, USA. fbrehin@fit.edu

Résumé :

Afin de restaurer les plages en aval de Sebastian Inlet, Floride, USA, des projets de rechargement ont été menés depuis plus de 20 ans, le plus récent datant de 2007. Parallèlement, le district a entrepris une campagne de suivi morphodynamique, comprenant des mesures hydrodynamiques et des relevés bathymétriques biannuels. Ces éléments ont permis à la fois l'analyse de l'évolution des stocks sableux et l'application de modèles numériques couplés du Coastal Modeling System (CMS). Les changements de bathymétrie et du trait de côte sont caractérisés par une forte variabilité spatio-temporelle: une avancée du trait de côte et des dépôts sédimentaires concentrés sur la partie supérieure de la plage sous-marine au sud de la zone de rechargement, ainsi que sur le delta de jusant. Le modèle morphodynamique a permis la reproduction de l'évolution bathymétrique sur l'année 2007, la mise en évidence d'un transport cross-shore complexe au niveau des récifs ainsi qu'une inversion dans le transport longshore créé par la réfraction de la houle sur le delta. Ce mécanisme serait à l'origine de l'engraissement du delta de jusant et des plages entre la jetée sud et les barres de swash, remettant en question la localisation des projets de rechargement.

Mots-clés :

Embouchure tidale – Delta de jusant – Rechargement de plage – Modèle numérique

Abstract: In order to renourish the downdrift beaches at Sebastian Inlet, FL, USA, multiple fill projects have been undertaken over the past 2 decades or so, with the most recent one in 2007. Sebastian Inlet has undergone intense monitoring by the district, including hydrodynamic data (waves, water levels, currents) and hydrographic surveys, used to calculate bathymetric and shoreline changes over various time scales, and to apply and calibrate a morphologic model part of the Coastal Modeling System (CMS), developed by the US Army Corps of Engineers. Results indicate sand deposition and shoreline advancement south of the project location, but also around the ebb shoal system. The model successfully reproduced sedimentation patterns over a year-long run, including cross-shore sand transport and complex sand trapping along the reef lines. Simulations also demonstrated reversals in the longshore transport direction, due to wave refraction around the ebb shoal, which could explain sand back-passing toward the inlet.

1. Introduction

Le littoral floridien subit depuis une trentaine d'années une érosion accentuée due à la stabilisation des embouchures tidales par des jetées. Afin de restaurer les plages en aval, de nombreux projets de rechargement ont été mis en place depuis les années 1970, avec des résultats souvent discutables. Des relevés bathymétriques successifs permettent de quantifier les échanges sédimentaires mais la résolution temporelle reste limitée et il est difficile de comprendre les interactions sur des échelles de temps courtes, de l'ordre de quelques heures par exemple lors de tempêtes. Des simulations numériques permettent d'améliorer la compréhension des mécanismes de transport et la réponse morphologique spécifique aux conditions hydrodynamiques. Cet article présente une partie des résultats d'un projet de suivi morphodynamique et de modélisation numérique de l'embouchure tidale de Sebastian. Les calculs de changements de bathymétrie et du trait de côte sont effectués sur plusieurs périodes entre 2000 et 2009, incluant des événements importants (cyclones et projets de rechargement). Ces résultats sont combinés à des données hydrodynamiques pour appliquer et calibrer un modèle morphologique (couplage CMS-Flow/CMS-Wave de l'armée américaine), qui reproduit le transport sédimentaire et les évolutions morphologiques de l'embouchure et des plages adjacentes.

2. Zone d'étude

2.1 Situation géographique et géomorphologique

Sebastian Inlet se situe sur la côte Est de Floride et sépare la lagune d'Indian River de l'Océan Atlantique (figure 1). L'île barrière aux alentours ne dépasse pas les 2 km de largeur ni les 10 m de hauteur au dessus du niveau moyen. La zone est caractérisée par une grande variabilité dans la taille des sédiments (0,2 à 0,5 mm), mais aussi dans leur composition. L'embouchure atteint sa configuration finale dans les années 1970, après le dynamitage dans la roche pléistocène "coquina" d'un chenal étroit et d'une trappe à sable (extrémité Ouest du chenal), et la stabilisation à l'aide de deux jetées (figure 1). La géomorphologie de l'embouchure est marquée par une série de récifs submergés au sud, et un delta de jusant conséquent qui s'est développé à la suite de la stabilisation et se rattache à la côte au sud à 1 km environ (ZARILLO & BREHIN, 2009).

2.2 Projets de rechargement

Les projets de rechargement couvrent environ 3 km de plage en aval de l'embouchure, entre les marqueurs "R5" et "R16" (figure 1). Ces points de référence utilisés pour les levés de plage, ont été placés par le département de protection environnementale de Floride (FDEP) tous les 300 m et s'incrémentent du nord au sud de chaque comté. Les rechargements totalisent environ 1000000 m³ sur une vingtaine d'années et consistent en un dragage de la trappe à sable ou de sources externes à l'embouchure, et placement du sable via un système de pompes et de pipelines. Le projet "Ambersand" qui remonte

a 2003 est le plus conséquent (500000 m³). Le plus récent dragage de la trappe date de mars 2007 (100000 m³) et est complété par 120000 m³ en novembre 2007 provenant d'un site externe, suite à une saison des cyclones intense. Depuis 1990, le district a mis en œuvre un plan de suivi morphodynamique qui inclut des relevés hydrographiques et des photographies aériennes.

2.3 Climat hydrodynamique

Une station météorologique sur la jetée nord et des capteurs de type ADCP sont maintenus par le laboratoire d'ingénierie côtière au Florida Tech (figure 1). Ce système a permis de caractériser le climat hydrodynamique sur le long terme et lors de passages de tempêtes, mais également de calibrer et de valider des modèles numériques, avec des comparaisons de courants et hauteurs de houle.

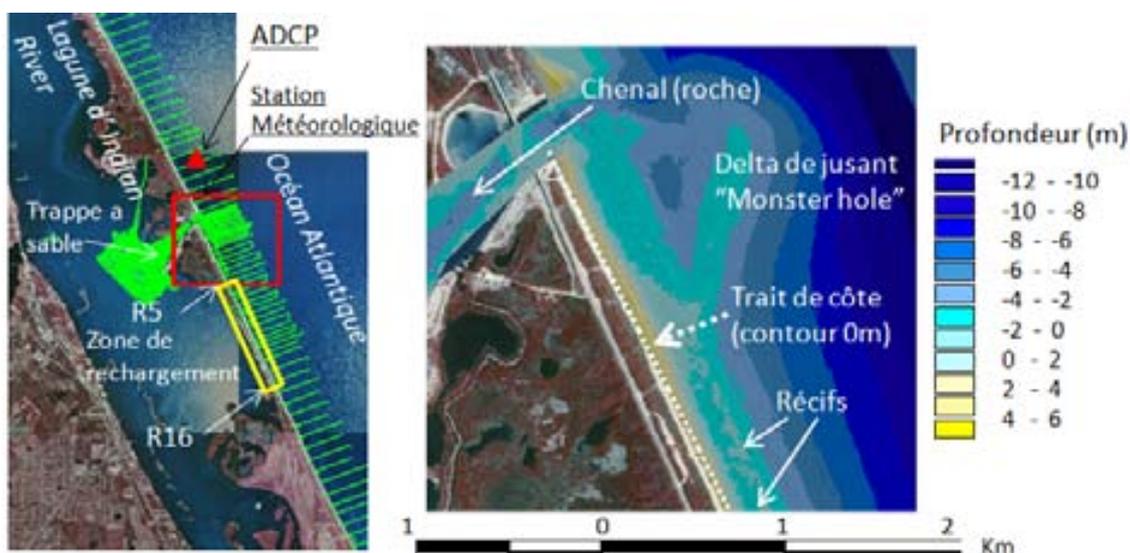


Figure 1. Zone d'étude et couverture des relevés bathymétriques.

L'embouchure est dominée par la houle, avec une hauteur moyenne annuelle de 0,6 m (pouvant dépasser les 3 m durant les tempêtes hivernales et les cyclones en été), et un fort signal saisonnier. Le transit littoral moyen de direction sud peut atteindre 250000 m³/an et résulte d'un transport vers le sud en hiver et vers le nord en été (ZARILLO & BREHIN, 2009). La marée est de type semi-diurne microtidale avec une amplitude océanique d'un peu plus de 1 m, qui diminue fortement dans la lagune. La combinaison d'un chenal étroit et le volume important de la lagune (prisme tidal de 10x10⁶ m³) génèrent de forts courants de marée (2,5 m/s en vives eaux entre les jetées), qui limitent le dépôt sédimentaire dans le chenal et sont à l'origine de la formation des deltas. Les interactions houle-courant à marée descendante accentuent les risques de navigation et rendent les mesures *in situ* difficiles.

3. Matériel et méthodes

3.1 Les changements bathymétriques et du trait de côte

Des données de bathymétrie ont été collectées bi annuellement depuis 1990 par des compagnies locales spécialisées, conformément aux normes du manuel de relevés hydrographiques de l'armée américaine (USACE, 1994). La couverture inclut une zone d'environ 20 km (figure 1), avec une résolution maximale autour de l'embouchure (variant de 1 à 5 m selon les années). Les données de latitude, longitude et élévation (x,y,z) ayant des coordonnées locales "state plane 1927" (horizontal) et NGVD29 (vertical) en mètres, sont incorporées dans un logiciel de SIG (Arcview GIS3.2). Des modèles numériques de terrain (MNT) sont ensuite générés pour déterminer l'évolution bathymétrique sur une multitude d'échelles de temps et extraire le trait de côte à partir du contour des 0 m hydrographique (figure 1).

3.2 Description et application des modèles numériques

Le modèle morphodynamique repose sur un couplage du modèle de propagation de houle (CMS-Wave) et du modèle d'écoulement de marée (CMS-Flow), appartenant au Coastal Modeling System (CMS) développé par le Laboratoire d'hydraulique côtière de l'armée américaine. Le modèle hydrodynamique bi-dimensionnel horizontal (ancien code M2D) utilise une méthode des volumes finis et possède un code de calcul de transport sédimentaire avec la possibilité de simuler les zones non érosives (BUTTOLPH *et al.*, 2006). Le modèle de houle (ancien WABED), est un modèle de propagation des vagues de phase moyenne et inclut des phénomènes tels que réfraction, diffraction, réflexion, ainsi que les interactions houle-courant (DEMIRBILEK *et al.*, 2007). Le couplage s'effectue sur l'année 2007 toutes les trois heures à l'aide du "Steering Module" de l'interface SMS (Surface Water Modeling System). Les grilles de modélisation s'étendent sur environ 10 km de part et d'autres de l'embouchure et 5 km au large (20 m de profondeur). La grille du modèle d'écoulement de marée s'emboîte dans celle du modèle de houle, avec une taille similaire des mailles qui varie entre 50 m au bord et 200 m au large. Le trait de côte est digitalisé à partir d'une image aérienne de 2007 et la bathymétrie combine les relevés de janvier 2007 discutés dans la section précédente, et celles du Coastal Relief Model (National Geodetic Data Center). Les zones non érosives au sud de l'embouchure provenant d'une campagne récente de caractérisation des fonds sous marins à l'aide d'une sonde acoustique mono faisceau (type RoxAnn) sont incluses dans la grille, ainsi que des stations d'observation pour l'extraction du transit littoral (total de 62 rangées de 5 cellules sur l'ensemble du domaine représentant la plage sous-marine jusqu'à une profondeur d'environ 3 m). Pour le transport sédimentaire, la formule de transport de Lund-CIRP est utilisée, avec une taille moyenne de grain variant entre 0,2 mm et 0,3 mm. Pour le modèle hydrodynamique, les conditions aux limites sont issues du logiciel de prédiction de

marée IOS. Des séries de hauteur d'eau extraites toutes les heures sont appliquées aux extrémités Est (océan), Nord lagune et Sud lagune de la grille du modèle. La vitesse et la direction du vent provenant de la station météorologique sont appliquées uniformément à la grille. Les conditions aux limites du modèle de houle (hauteurs, périodes et directions de pic) proviennent d'une simulation à plus grande échelle du même modèle CMS-Wave forcé avec les données de Wavewatch 3 (TOLMAN, 2009).

4. Résultats et discussion

4.1 Evolution bathymétrique et du trait de côte

Les changements bathymétriques sur le long terme (figure 2a) indiquent un fort engraissement des deltas, de la trappe à sable, et de la plage directement en aval de l'embouchure entre la jetée sud et les barres de swash (jusqu'à +2 m). Cette section de plage subit une forte avancée du trait de côte (+35 m) durant cette période (figure 3a), alors que la zone de rechargement est caractérisée par un recul (-10 à -25 m), et l'érosion généralisée de la partie supérieure de la plage sous-marine. Des zones de déposition sont observées sur les plages au sud de la zone de rechargement (R20-R30).

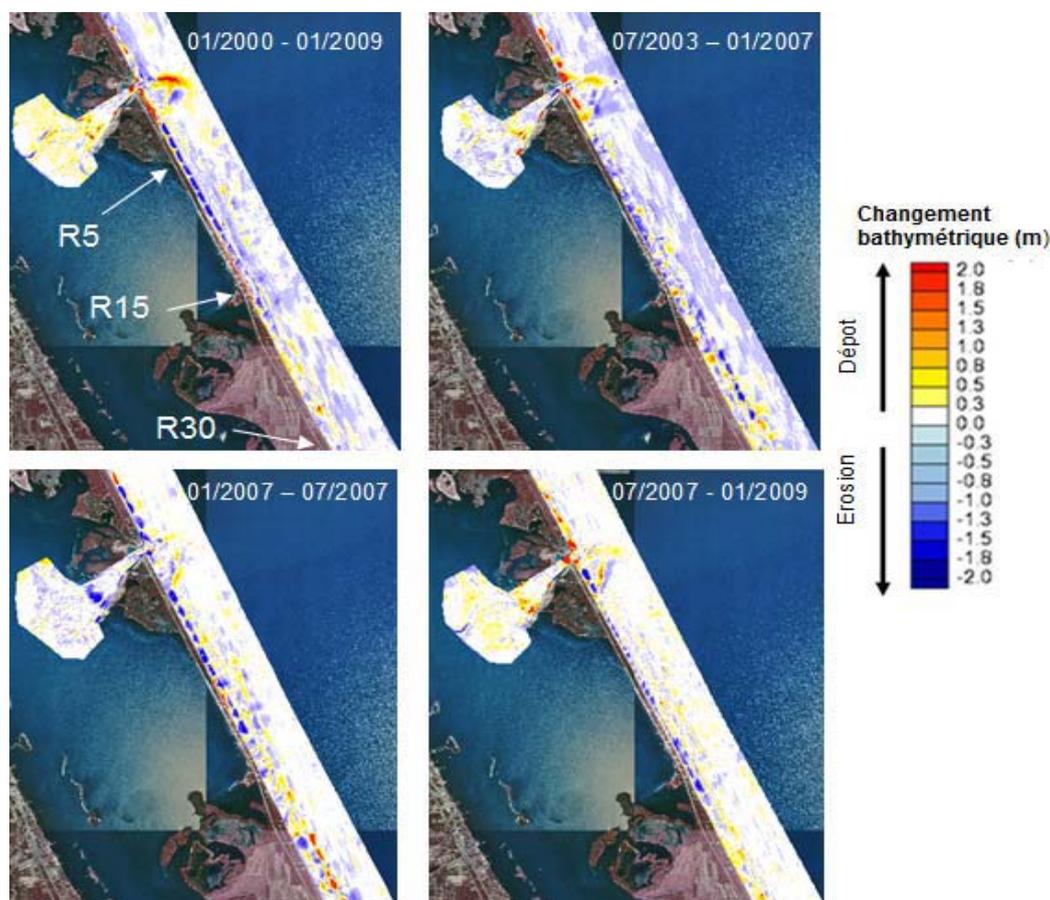


Figure 2. Changements bathymétriques pour plusieurs périodes entre 2000 et 2009.

Thème 2 – Dynamique sédimentaire et transports des particules

L'évolution bathymétrique de 2003 à 2007 (figure 2b) montre des similarités avec la période précédente: une érosion importante de l'avant plage sur la zone de rechargement (R5-R15) et des zones de déposition concentrées sur la section de plage directement en aval de l'embouchure (R1-R5), et au sud de la limite des projets de rechargement (R15-R30). Ces résultats suggèrent un transport sédimentaire à la fois vers l'embouchure et vers le sud (interaction avec les récifs). L'évolution du trait de côte pour cette période (figure 3b) souligne une avancée au sud de la limite du projet (+25 m), suggérant que le rechargement de 2003 a été bénéfique à la zone en aval.

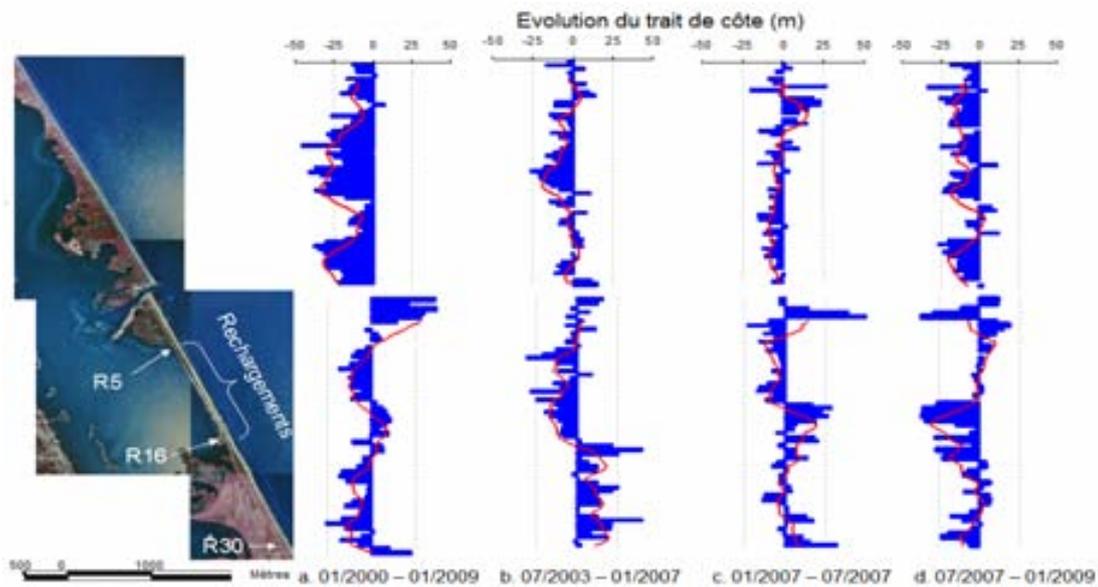


Figure 3. Changements du trait de côte sur plusieurs périodes entre 2000 et 2009.

Les différences bathymétriques entre janvier et juillet 2007 (figure 2c) illustrent l'érosion de la trappe à sable résultant des opérations de dragage (-2 m), et de la partie supérieure de la plage sous-marine située entre la jetée sud et R15. Les dépôts sédimentaires (+1,5 m) sont concentrés sur la partie inférieure de la plage sous-marine de la zone de rechargement (R4-R16), et au sud de R20. Ces observations, combinées à l'absence de dépôt significatif sur le delta de jusant, suggèrent un transport important vers le sud qui serait dû au cyclone Andrea (mai 2007). L'évolution du trait de côte (figure 3c) sur cette période remet en question l'efficacité du projet de mars 2007, avec des avancées concentrées sur la section de plage de la jetée sud à R4 (+50 m) et au sud de R20 (+20 m) alors que la section rechargée subit un recul de 10 m en moyenne. Les changements de juillet 2007 à janvier 2009 (figure 2d) présentent des similarités avec ceux de la période précédente : une érosion (-1 m) de la section rechargée et des dépôts (+0,5 m) au pied des jetées et au sud de la zone de rechargement. Le trait de côte (figure 3d) avance faiblement sur la partie rechargée (+5 à +10 m) et recule au sud de R15, entraînant une partie des dépôts observés sur le bas de plage de cette zone.

4.2 Modélisation morphodynamique

L'évolution bathymétrique reproduite par le modèle sur l'année 2007 (figure 4) indique un fort dépôt sur le delta de jusant (+2 m), la partie supérieure de la plage sous marine, et l'extrémité Est du chenal. L'érosion domine la partie Ouest du chenal, la plage inférieure et la bordure du delta. Le modèle compare l'évolution morphologique en fonction du climat hydrodynamique. Deux événements importants interviennent en 2007. Le cyclone Dean, circulant dans les Caraïbes, génère une houle moyenne d'orientation SE ($H_s=1,2$ m, $T_p=13$ s), représentative des conditions peu énergétiques estivales. Le cyclone Andrea longe la côte floridienne en générant une forte houle d'Est/Nord Est ($H_s=3$ m, $T_p=15$ s), similaire aux conditions des tempêtes hivernales.

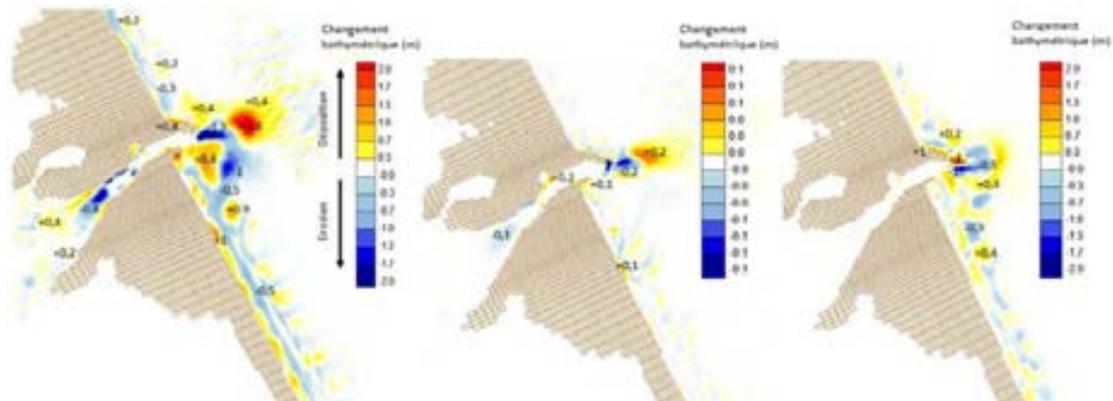


Figure 4. Changements bathymétriques calculés par le modèle: Année 2007 (gauche), cyclone Dean, 72 heures (milieu), cyclone Andrea, 72 heures (gauche).

Les changements bathymétriques modélisés pour le cyclone Dean (figure 4) montrent une faible érosion (-0,1 m) à l'extrémité de la jetée nord, une déposition sur la partie offshore du delta (+0,1 m), et des changements peu significatifs sur le haut de la plage sous-marine au sud. Le transit littoral (figure 5) est dirigé vers le nord et de faible intensité (maximum de +250 m³), ce qui est en accord avec l'orientation de la houle.

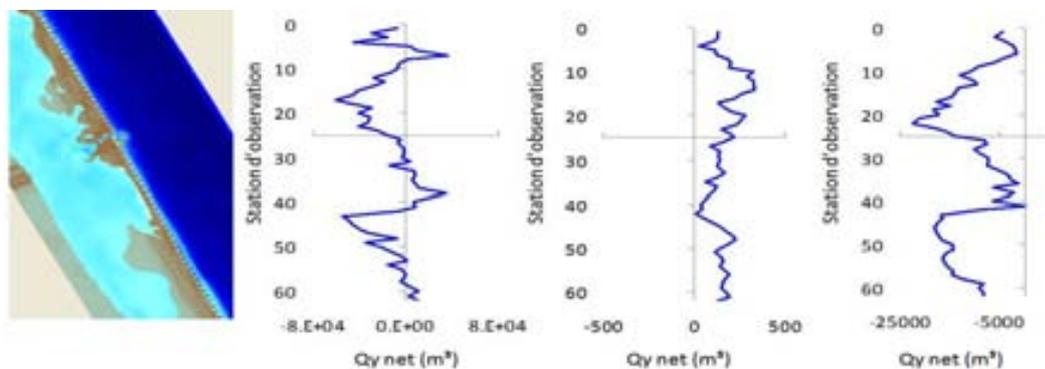


Figure 5. Transport littoral calculé par le modèle: Année 2007 (gauche), cyclone Dean, 72 heures (milieu), cyclone Andrea, 72 heures (gauche).

Thème 2 – Dynamique sédimentaire et transports des particules

Les changements dus au cyclone Andrea (figure 4) sont beaucoup plus importants, avec des dépôts sédimentaires le long de la jetée nord et sur le delta de jusant (+1 m), ainsi qu'une alternance entre des zones de dépôt et d'érosion sur la partie supérieure de la plage sous-marine au sud de l'embouchure. Le transit littoral vers le sud atteint presque 20000 m³ sur certaines zones (figure 5). Sur le long terme, le transport est majoritairement dirigé vers le sud (valeurs négatives). Les résultats indiquent toutefois des variations spatiales complexes: une réduction de l'intensité du transport près de l'embouchure et une inversion dans la direction entre l'embouchure et la station d'observation 50 (limite Sud de la zone de rechargement).

5. Conclusions et perspectives

Les changements bathymétriques et du trait de côte autour de Sebastian Inlet sur la dernière décennie ont mis en évidence des différences spatio-temporelles complexes et permis la distinction de 3 zones en aval de l'embouchure: de la jetée sud à R5; de R5 à R15 (zone de rechargement), et de R15 à R30. Les résultats soulignent le contraste du bilan sédimentaire et l'importance de la géomorphologie locale (delta, récifs) dans le contrôle naturel de l'érosion. Les projets de rechargement de 2003 et 2007 ont eu tendance à engraisser les plages situées au sud de la limite des projets (R15-R30) et derrière le delta de jusant. Les simulations numériques pour l'année 2007 démontrent un comportement correct du modèle sur le plan de l'hydrodynamique et du transport sédimentaire, et le rôle prépondérant du delta de jusant favorisant la réfraction de la houle et l'inversion de la direction du transit littoral. Notre travail consistera à calibrer le modèle morphodynamique sur des échelles de temps plus longues, et à déterminer sa "performance" grâce à une approche probabiliste (score de Brier).

6. Références bibliographiques

- BUTTOLPH A.M., REED C.W., KRAUS N.C., ONO N., LARSON M., CAMENEN B., HANSON H., WAMSLEY T., ZUNDEL A.K. (2006). *Two-dimensional depth-averaged circulation model CMS-M2D: Version 3, Report 2, Sediment transport and morphology change*. ERDC/CHL TR-06-09, U.S.A E.R.D.C., Vicksburg, MS.
- DEMIRBILEK Z., LIN L., ZUNDEL A. (2007). *WABED model in the SMS: Part II Graphical interface*. ERDC/CHL. CHETN-I-74. U.S.A E.R.D.C., Vicksburg, MS.
- TOLMAN H.L. (2009). *User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14*. NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 276, 194 pp.
- USACE -U.S. Army Corps of Engineers- (1994). *Engineering Manual for Hydrographic Surveys*. Washington, D.C., EM 1110-2-103.
- ZARILLO G.A, BREHIN F.G. (2009). *State of Sebastian Inlet Report: An Assessment of Inlet Morphologic Processes, Historical Shoreline Changes, Local Sediment Budget and Beach Fill Performance*. Technical Report 2009-1, Sebastian Inlet District, FL.