Modélisation morphodynamique d'une embouchure lagunaire.

Matthieu Fiere

*DHI Eau et Environnement
1 rue Du Guesclin, 44000 Nantes*

Hakeem K. Johnson, Sanne L. Niemann

*DHI Water & Environment
Agern Allé 5, DK-2970 Hørsholm, Danemark*

Résumé

L'objet de cette communication est la modélisation numérique de l'évolution morphologique d'une embouchure lagunaire forcée par les courants de marée. Une lagune schématique est définie à l'aide du modèle DHI d'évolution morphologique MIKE 21 CAMS qui rassemble les modules de calcul hydrodynamique, de propagation des vagues et de transport sédimentaire. Ces moteurs de calculs en différence finies sont combinés afin de simuler l'évolution de la bathymétrie dans le temps. Une fois le modèle numérique calé sur les données expérimentales de Seabergh et al.¹⁴, différents essais mettent en valeurs l'évolution du chenal et notamment l'érosion sur les pentes transversales au courant, érosion responsable de son élargissement. L'importance de cet élargissement est un paramètre clé pour la stabilité d'une lagune. Les sections en travers simulées sont donc comparées avec celles mesurées en laboratoire pour des cas de courant seul. Dans un deuxième temps les différents résultats obtenus avec le modèle CAMS sont confrontés avec le nouveau modèle FM. Ce dernier résout les équations couplées de courants et de vagues par la théorie des volumes finis, sur un maillage non structuré (FM = Flexible Mesh) et offre de nouvelles possibilités pour la modélisation numérique 2D.

Abstract

This paper deals with the morphodynamic modelling of cross-section stability at tidal inlets. An idealized inlet is built with the DHI's numerical tool MIKE 21 CAMS which is a control shell that combines MIKE 21 finite different models for waves, flow and sand transport with a bed level update scheme to model the morphological evolution in time. Once the model is calibrated according to the experiments of Seabergh et al.¹⁴, several tests are carried out to show the inlet evolution and particularly the slope erosion which is responsible for its widening. This enlargement is a key parameter for the cross-section stability of an inlet. Simulated cross-sections are thus compared to the results of the lab in pure current cases. In a second time the computations obtained with MIKE 21 CAMS are confronted with those from the DHI's new model FM. This integrates the coupled equations for current and waves using the finite volume theory and allows new possibilities in the 2D numerical modelling.

1. Introduction

Les systèmes lagunaires peuvent être schématisés par une baie reliée à l'océan par un ou plusieurs chenaux. Constituant un environnement naturel privilégié pour la plaisance ou le commerce, ils ont toujours été l'objet d'attentions de la part des ingénieurs en génie côtier et des autorités pour que cette voie navigable reste constamment praticable. Les études menées jusqu'alors ont permis d'établir des

relations empiriques reliant l'aire du profil en équilibre avec le prisme de marée, c'est-à-dire le volume d'eau entrant et sortant de la baie. Ces relations empiriques basées sur l'équation d'équilibre de O'Brien^{12, 13} et la courbe de vitesse maximale de Escoffier^{3, 4} sont encore communément utilisées puisqu'elles constituent un très bon outil de prédiction du profil stable d'une lagune. Néanmoins, de leur point de vue empirique, ces relations entraînent une perte d'informations sur les processus côtiers et doivent être ajustées pour chaque site. Jarrett⁷ différencie par exemple les lagunes de l'Atlantique, du Pacifique et du Golfe du Mexique ainsi que celles consolidées avec une ou deux jetées. L'intérêt d'un modèle numérique est donc de s'affranchir des spécificités géographiques et des distorsions d'échelle dans le cadre de modèles réduits pour dégager une relation plus générale entre la section d'équilibre et les différents paramètres physiques régissant les phénomènes des embouchures. Cette publication présente une partie de l'étude complète (Johnson¹⁰) dans laquelle une analyse dimensionnelle permet d'identifier ces paramètres et une série d'essais amène à établir une loi de comportement adimensionnelle. Le présent article met l'accent sur le dispositif expérimental (§2), un système lagunaire 'idéalisé' modélisé avec les modèles MIKE 21 et MIKE FM (§ 3), et le calage de ces modèles sur les essais en laboratoire de Seabergh et al.¹⁴ (§ 4). L'évolution morphologique simulée par le module CAMS est discutée (§ 5) puis comparée avec les résultats obtenus par le modèle FM (Flexible Mesh) de DHI.

2. Dispositif expérimental

Les modèles numériques édités sous MIKE 21 et MIKE FM reproduisent fidèlement la maquette du CIRP (Coastal Inlets Research Program - US Army Corps of Engineer), un bassin de 46,4m de largeur sur 93,6m de long. L'océan est composé d'une zone à trois frontières ouvertes (Est, Nord et Sud) d'une profondeur maximale de 30,6cm relié à la baie par une pente constante de 1:3 jusqu'à une profondeur de 18,3cm puis par un profil stable de type $z = A \cdot x^{2/3}$ (Dean²) avec $A = 0.24$. Le chenal a une longueur de 1,22m, une largeur de 60cm au niveau moyen de la marée avec des pentes de 1:1,4 et une profondeur constante de 13,2cm. Il est protégé par deux jetées de 5,4m, distantes de 3,6m. La baie, délimitée par des murs verticaux s'étend sur 2714m² pour une profondeur de 13,2cm. La séparation entre la baie et l'océan est constituée d'un bras de sable coupé en son milieu par le chenal : d'une hauteur de 48cm, ce bras n'est jamais submergé.

La condition limite aux trois frontières est un signal de marée sinusoïdal de période 105,4min (marée semi-diurne à l'échelle de la maquette) et de marnage 3,05cm. La friction à l'intérieur du chenal est modélisée par le nombre de Manning, paramètre sur lequel va se faire le calage hydrodynamique du modèle. Les caractéristiques des sédiments pour le diamètre médian, la dispersion, la porosité et la densité apparente sont les suivantes :

$$d_{50} = 0,13\text{mm} ; \sigma = 1,5 ; p = 0,4 ; s_p = 2,65$$

Figure 1 : Bathymétrie de la lagune schématisée

Le transport sédimentaire est évalué par deux théories distinctes que sont Engelund & Hansen⁵ (E-H) et Zyserman & Fredsøe¹⁵ (Z-F). Ces deux théories se différencient principalement par la façon dont le transport sédimentaire est défini : E-H⁵ suppose un transport total alors que Z-F¹⁵ le décompose en transport par charriage et transport en suspension en tenant compte du paramètre de Shield. A l'origine le chenal a une forme qui reproduit le modèle réduit, un canal rectiligne se resserrant en son milieu. Deux sections sont définies pour le relevé des profils en travers, la section 2 côté baie et la section 4 côté océan. Le profil d'origine a une aire de 550cm² par rapport au niveau moyen de la marée (Figure 4). Les essais sont effectués sur 20 cycles de marée, temps au bout duquel la section d'équilibre est atteinte c'est-à-dire que les variations résiduelles de la bathymétrie sont faibles.

3. Présentation des modèles

3.1. CAMS

Le modèle DHI CAMS (Johnson^{8, 9}) est un module qui réunit trois moteurs de calcul en différences finies de la suite MIKE 21 afin de simuler l'évolution morphologique d'une bathymétrie dans le temps. Il fonctionne par boucle en calculant tout d'abord le transport sédimentaire qui permet d'évaluer le taux de changement des fonds. Ce taux est considéré comme constant durant un pas de temps dt_{morph} pendant lequel la bathymétrie est mise à jour en continu afin de calculer le champ de vague. La synthèse des informations de bathymétrie et du champ de vague permet enfin le calcul de l'écoulement. La boucle reprend alors le calcul du transport sédimentaire avec ces nouvelles données, et continu selon ce schéma pour toute la durée de simulation. Ce modèle a été spécialement développé pour l'étude de l'évolution morphologique littorale due à des constructions (épaves, ports...) ou à des phénomènes naturels.

3.2. Série FM

MIKE 21 FM (Flexible Mesh) est le nouveau modèle développé par DHI. Il résout les équations de conservation de la masse et de l'énergie cinétique intégrées sur la

colonne d'eau selon les deux directions horizontales par la méthode des volumes finis. Il permet l'utilisation du maillage déstructuré composé d'éléments triangulaires dont la taille peut être librement définie afin d'affiner les zones d'intérêt. Ainsi pour le système lagunaire la taille d'une maille est de 0,01m² dans le chenal (0,04m² dans CAMS) alors qu'elle peut être relâchée à 8m² dans la partie océanique. Ce faisant on limite le nombre de nœuds à 2024 (contre 108576) et donc le temps de calcul, sans perdre de précision dans les résultats. De plus, FM permet le calcul du transport sédimentaire dans des cas de courant seul ou de courant couplé avec les vagues. Dans ce dernier cas, FM résout un vrai couplage vagues-courant alors que CAMS intègre séparément le champ de vague et les courants. Trois modes sont disponibles : le premier est utilisé pour des problèmes dominés par les courants, le second pour des problèmes dominés par les vagues et enfin le troisième dans les cas particuliers où à la fois les vagues et les courants entrent en jeu. Le logiciel définit alors dans chaque cellule si le mode 1 ou le mode 2 doit être utilisé selon que prédominent les vagues ou les courants.

Figure 2 : Maillage déstructuré appliqué au modèle.

4. Calage Hydrodynamique

4.1. Equation de Manning

Le nombre de Manning M est constant sur tout le domaine. Il symbolise la friction au fond et sur les cotés pour le chenal selon la formule valable en écoulement permanent :

$$U = M \times R^{2/3} \times S^{1/2} \quad (1)$$

avec : U vitesse de l'écoulement

R le rayon hydraulique (aire / surface mouillée)

S la pente de la surface libre

La friction dans le chenal régie la vitesse maximale mais aussi l'amplitude de la marée dans la baie et le déphasage par rapport au signal océanique. Ce sont les trois paramètres sur lesquels se base le calage du modèle. En effet lorsqu'on augmente le nombre de Manning, la résistance dans le chenal diminue et la vitesse de l'écoulement augmente. De la même manière la quantité d'eau entrant dans la baie est plus importante et le déphasage diminue.

4.2. Calage

Les hauteurs d'eau sont relevées à la fois dans l'océan et dans la baie et les vitesses dans le chenal, pour être comparées avec les données expérimentales de Seabergh et al.¹⁴. Ces données sont regroupées dans le tableau où le déphasage,

mesuré au niveau moyen, est moyenné sur trois cycles de marée.

Tableau 1 : Données de calage pour les modèles CAMS et FM

	Modèle physique		CAMS		MIKE 21 FM	
	Océan	Baie	Océan	M30	M30	M60
marnage (cm)	3,02	1,88	3,04	1,92	1,63	1,80
marnage baie/marnage océan	X	0,62	X	0,63	0,54	0,59
déphasage (s)	X	1091	X	1110	903	892
courant maximum (m/s) (montant cycle1)	X	0,4	X	0,36	0,37	0,39

La figure 3 représente un exemple de réponse hydraulique pour un Manning de $30 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ et met en valeur le déphasage et l'amortissement entre les deux signaux de marée. Il est intéressant de constater également comment la hauteur d'eau dans le chenal suit le signal océanique à marée montante, et le signal de la baie à marée descendante. C'est bien la différence de hauteur d'eau et donc la friction qui régit l'écoulement. Pour un bon compromis entre les trois paramètres, un Manning de $30 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ a été choisi pour le modèle CAMS alors que pour FM $M=60 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$ est plus satisfaisant. Cela mis à part, tous les paramètres hydrauliques et sédimentaires sont identiques pour les essais réalisés avec les deux modèles de façon à ce qu'ils soient comparables.

Figure 3 : Réponse hydraulique de la lagune obtenue avec CAMS pour $M=30 \text{ m}^{1/3} \cdot \text{s}^{-1}$.

5. Evolution morphologique

5.1. Résultats CAMS

Les essais mettent en évidence deux tendances générales : l'érosion des flancs et le transport et le dépôt du matériau. Le chenal agit comme un goulet accélérateur de l'écoulement, le courant atteint alors des vitesses de $0,4 \text{ m/s}$ et va fortement éroder les parois, qui vont progressivement atteindre la pente d'équilibre, de l'ordre de 30° .

Figure 4 : Bathymétrie et section initiales. (MTL = Mean Tide Level)

Figure 5 : Bathymétrie après 20 cycles de marée, simulation CAMS avec Zyserman & Fredsøe⁸ (gauche) et en laboratoire (droite – Seabergh et al.¹).

Evolution of inlet cross-section at station 2 after 19 cycles

Figure 6 : Section en travers mesurée et simulée selon deux théories de transport (CAMS).

Une partie des sédiments est déposée à l'entrée ou la sortie de la passe, l'autre dans le chenal même (Figure 5). L'érosion la plus importante se situe logiquement au centre de la passe, là où la vitesse du courant y est la plus grande. A la fin de la simulation le chenal s'est élargi de 1,2m pour une profondeur de 9cm ce qui représente un dépôt moyen de 4cm.

L'observation des sections en travers permet d'avoir une idée plus précise des phénomènes sédimentaires. Sur la figure 6 sont représentées les sections initiales, mesurée en laboratoire et simulées d'après Z-F¹⁵ et E-H⁵. La section à l'équilibre a une aire de 1580cm² pour Z-F¹⁵, 1520cm² pour E-H⁵ contre 1720cm² en laboratoire. Les profils sont concordants avec les expérimentations, les flancs étant parallèles avec un angle proche de celui d'équilibre même si la profondeur maximale est un peu sous-estimée. Ceci rejoint les remarques faites sur les vues 2D où la tendance générale est à la déposition dans le chenal alors que la profondeur maximale reste quasi-identique en laboratoire. Pour finir, les distinctions entre les deux théories de transport sont minimales : les flancs sont plus érodés dans leur partie haute avec Z-F¹⁵ ce qui n'est pas totalement compensé par la profondeur quelque peu diminuée.

La simulation présente donc des résultats de grande qualité, tant au point de vue de l'aire à l'équilibre que de la répartition largeur / profondeur de la section. On notera cependant que les irrégularités du modèle expérimental ne sont pas reproduites par la simulation qui présente un profil parfaitement symétrique.

5.2. Résultats MIKE 21 FM

Lors des premiers tests réalisés avec une version en cours de développement, il est apparu que le phénomène d'érosion des flancs n'était pas inclus dans le modèle. La figure 7 présente le résultat de cette simulation nommée test 0 confronté au test 1 réalisé après inclusion de ce phénomène. Dans FM, l'érosion des berges est calculée d'après la pente que forment un point hors d'eau et un point en eau consécutifs. Si cette pente est supérieure à celle indiquée par l'utilisateur, généralement égale à la pente d'équilibre de 30 degrés, la quantité de sédiment nécessaire au retour à l'équilibre est enlevée de la berge. Dans CAMS l'augmentation du transport dû à l'érosion des berges est proportionnelle à la pente, au transport longitudinal sur fond plat et à la diffusivité transverse ε_n définie comme suit, où φ est l'angle de friction dynamique :

$$\varepsilon_n = \frac{1}{\tan \varphi} \quad (2)$$

Dans le cas test 0 on voit clairement que les flancs présentent une pente irréaliste, de l'ordre de 70°. Une fois la correction apportée (test 1), l'érosion est correcte et les berges résultantes sont très proches des expérimentations menées en laboratoire. De même l'élargissement du chenal est très satisfaisant ce qui mène à dire que le phénomène a été correctement modélisé. Notez que le côté gauche du profil simulé présente un contour assez éloigné de la mesure à cause d'un problème de maillage. La cellule triangulaire reproduit ici moins bien la bathymétrie très rectiligne du chenal éditée à l'origine avec un maillage cartésien et il conviendrait de remailler cette zone manuellement.

Figure 7 : Comparaison des sections mesurée et simulées avec CAMS et FM

6. Conclusions

L'objet de cette communication est la modélisation numérique d'un système lagunaire et l'étude détaillée de la stabilité transversale de son chenal. A cet effet un modèle numérique d'une lagune schématisée a été construit à l'aide de MIKE 21 et différentes simulations morphodynamiques ont été menées.

Le calage du modèle met en valeur le fonctionnement hydrodynamique d'un tel système et notamment l'importance de la friction dans le chenal qui régit l'écoulement et par conséquent l'érosion.

Les essais de transport sédimentaire font apparaître les phénomènes d'érosions des berges de la passe et le transport puis la déposition de sédiment dans des conditions hydrauliques de courant seul. L'étude des sections en travers montre la grande qualité du modèle CAMS qui prédit avec une bonne fiabilité l'aire et la géométrie du profil à l'équilibre.

Le modèle FM est enfin introduit et ses performances dans le cadre de cette problématique démontrées. Il est donc possible d'utiliser cet outil innovant et flexible pour la modélisation de processus complexes alliant les courants de marée avec les phénomènes d'érosion et le transport sédimentaire. Les avantages de ce nouveau modèle sont de deux sortes : la simplicité de mise en œuvre puisque tous les modules sont regroupés sous la même interface là où il fallait configurer les modules séparément avec CAMS et éditer des fichiers « templates » pour les faire communiquer ; la souplesse du maillage flexible qui permet d'économiser des points de calcul hors de la zone d'intérêt.

Une étude incluant les phénomènes dus à la houle peut être envisagée comme prolongement à ce travail.

Remerciements

Ce travail a été effectué dans le cadre du stage de fin d'étude de M. Fiere pour l'obtention du diplôme d'ingénieur Centrale Nantes. Il a été soutenu financièrement par le Conseil de Recherche Technique Danois (STVF) dans le cadre du projet "Coast and Tidal Inlets" qui fait partie du thème de recherche "Utilisation and Protection of the Coastal Zone".

Références bibliographiques

1. Byrne, R. J., Gammisch, R. A., and Thomas, G. R. (1980). Tidal Prism-Inlet Area Relations for Small Tidal Inlets, *Proceedings of the Seventeenth Coastal Engineering Conference*, American Society of Civil Engineers, Sydney, Australia, Vol III, Ch 151, pp 23-28.
2. Dean, R. G. (1991). Equilibrium beach profiles : characteristics and applications. *Journal of Coastal Research*, 7, 53-84.
3. Escoffier, F.F. (1940). The Stability of tidal Inlets, *Shore and Beach*, Vol. 8, No. 4, pp 114-115.
4. Escoffier, F.F. (1977). Hydraulics and Stability of Tidal Inlets, *GITI Report 13*, 72 pp.
5. Engelund, F. and Hansen, E. (1976). A Monograph on Sediment Transport in Alluvial Channels. *Nordic Hydrology* 7, pp. 293-306.
6. Hugues, S. A. (2002). Equilibrium cross-sectional area at tidal inlets. *Journal of Coastal Research*, 18(1), 160-174. West Palm Beach (Florida)
7. Jarrett, J. T., (1976). Tidal Prism – Inlet Area Relationships. *GITI Report 3*, US Army Engineer Waterways Experiment Station, Vicksburg, Mississippi.
8. Johnson, H.K., I. Brøker, J.A. Zyserman (1994). Identification of some relevant processes in coastal morphological modelling. *Pro. 24th International Conference on Coastal Engineering*, Kobe, Japan.
9. Johnson, H.K., I. Brøker, J.A. Zyserman, K. Mangor (1995). Morphological response in the vicinity of offshore breakwaters. *Proc.of the IV COPEDC Conference*, Rio de Janeiro, Brazil.
10. Johnson, H.K. (2006). Morphodynamic modelling of stability of tidal inlets. *Proceedings of the 30th International Coastal Engineering Conference*, San Diego, USA. (à paraître)
11. Kraus, N. C. (1998). Inlet Cross-Section Area Calculated by Process-Based Model. *Proceedings of the 26th International Coastal Engineering Conference*, American Society of Civil Engineers, New York, Vol III, pp 3265-3278
12. O'Brien, M.P. (1931). Estuary Tidal Prism Related to Entrance Areas. *Civil Engineering*, Vol. 1, No. 8, pp. 738-739.
13. O'Brien, M.P. (1966). Equilibrium Flow Areas of Tidal Inlets on Sandy Coasts, *Proceedings of the 10th Coastal Engineering Conference*, Vol. 1, pp. 676-686.
14. Seabergh, W.C., D.B. King, Jr., B.E. Stephens from CIRC (2001). Tidal inlet equilibrium area experiments, inlet laboratory investigations.
15. Zyserman, J. and Fredsøe, F. (1994). Data Analysis of Bed Concentration of Suspended Sediment. *J. of Hydr. Eng.*, ASCE, Vol. 120, No. 9.