

Développement d'un modèle paramétrique à partir d'outils statistiques et numériques, application à l'hydrodynamique de l'embouchure de l'Adour

Jean Dubranna^a, Philippe Maron^b

Laboratoire des Sciences Appliquées au Génie Civil et Côtier, Université de Pau et des Pays de l'Adour, 1 Allée du Parc Montaury, 64600 Anglet, France

^a *Doctorant ; Tel: +33 5 59 57 44 35; Fax: +33 5 59 57 44 39 ;*

e-mail: jean.dubranna@univ-pau.fr;

^b *Maître de Conférences.*

Résumé

Des travaux antérieurs et des observations de terrain ont montré un lien entre les conditions de houle et le taux d'ensablement de l'embouchure de l'Adour. Après avoir confirmé l'existence d'une hydrodynamique propice à l'ensablement lors des fortes houles, l'étude présentée ici nous a permis d'établir une relation linéaire forte entre le flux d'énergie de la houle au large et la vitesse du courant induite sur un profil spécifique de l'embouchure. Nous proposons une méthode de reconstruction de la courantométrie de ce profil à partir de la seule connaissance du flux d'énergie de la houle au large. La finalité de cette étude est de connaître les caractéristiques des courants liés à la houle en temps réel afin, ultérieurement, de calculer les flux sédimentaires associés.

Abstract

Previous studies and field observations showed a relationship between the wave conditions and the Adour river mouth silting rate. Once the existence of favourable hydrodynamical conditions for channel infilling during strong wave events was confirmed, the present study allowed us to establish a strong linear relationship between the off shore swell energy flux and the wave induced current in a particular section of the mouth. Thus, we propose a method to assess the hydrodynamics along the section from the knowledge of the swell energy flux parameter. The ultimate goal of this study is to be able to predict the wave induced current in real time and to compute afterwards the associated sediment fluxes.

1. Introduction

Le chenal de navigation donnant accès au port de Bayonne, à l'embouchure de l'Adour, fait l'objet d'ensablements événementiels importants Dubranna et Maron¹ (2004). Pour maintenir l'accès des navires de commerce au port de Bayonne, les autorités portuaires sont tenues de draguer la zone deux fois par an moyennant un investissement financier conséquent. Parallèlement à ce phénomène, LCHF² (1976) et Abadie *et al.*³ (2004) ont mis en évidence une érosion importante des plages subtidales d'Anglet au sud de l'embouchure, ajoutant une composante environnementale à la problématique. Ce travail s'inscrit dans l'étude des flux sédimentaires entre les plages nord d'Anglet et l'embouchure de l'Adour, susceptibles d'être à l'origine des ensablements du chenal de navigation et de l'érosion des plages.

Un modèle paramétrique du courant généré par la houle à l'embouchure de l'Adour, basé sur la méthode statistique d'analyse factorielle 1D, est proposé en vue d'une application ultérieure au calcul des flux sédimentaires. Le modèle présente d'une part l'intérêt d'être basé sur des caractéristiques de la houle disponibles par pas de 3 heures en sortie du modèle Wavewatch III (Toleman⁴ (1999) et Toleman⁵ (1999)) au point de coordonnées 45°0'00"N – 5°0'00"W, d'autre part de réduire considérablement les temps de calcul afin de respecter les échelles temporelles d'évolution de l'ensablement de l'embouchure qui peuvent être journalières voire horaires. Ce modèle de courant est donc un premier pas vers une mise en évidence des flux sédimentaires entre les plages nord d'Anglet et l'embouchure sous l'effet de la houle et vers l'élaboration d'un outil de suivi de l'ensablement de l'embouchure en temps réel.

2. Simulations numériques

Le modèle paramétrique a été élaboré à partir d'une analyse factorielle réalisée sur les sorties de 33 simulations numériques du courant à l'embouchure pour diverses conditions de houle. Le domaine de simulation s'étant sur 16 km parallèlement à la côte de part et d'autre de l'embouchure, et sur 13 km vers le large. Le modèle TOMAWAC (EDF/DRD) a été utilisé pour simuler la propagation de la houle, en calculer les contraintes de radiation et déduire les forces motrices ; celles-ci sont ensuite utilisées dans TELEMAC2D (EDF/DRD) sous forme de termes source supplémentaires pour le calcul des courants induits. La réalisation de mesures in situ dans des conditions d'agitations semblables à celles proposées dans cet article étant prohibées pour des raisons de sécurité et de sauvegarde du matériel, les paramètres d'ajustement du modèle ont été établis à partir de mesures in situ de courant et de hauteurs de houle dans des conditions d'agitation faibles ($H_s < 1,5\text{m}$, travaux de Brière⁶ (2005)). Chaque simulation a été réalisée pour un niveau d'eau et un débit de l'Adour moyens, et est caractérisée par la hauteur significative (H_s) et la période de maximum d'énergie de la houle (T_p) aux frontières du domaine, qui sont les deux seuls paramètres qui varient d'une simulation à l'autre.

Tableau 1 : Récapitulatif des simulations réalisées

W (J.m.s ⁻¹)	(T_p , H_s) (s, m)	numéro de simulation	W (J.m.s ⁻¹)	(T_p , H_s) (s, m)	numéro de simulation	W (J.m.s ⁻¹)	(T_p , H_s) (s, m)	numéro de simulation
35 000	(8 ; 2,10)	1	120 000	(10 ; 3,50)	13	200 000	(10 ; 4,50)	25
	(10 ; 1,90)	2		(12 ; 3,19)	14		(12 ; 4,10)	26
	(12 ; 1,70)	3		(14 ; 2,95)	15		(14 ; 3,80)	27
50 000	(8 ; 2,50)	4	140 000	(10 ; 3,77)	16	250 000	(11 ; 4,81)	28
	(10 ; 2,20)	5		(12 ; 3,45)	17		(13 ; 4,42)	29
	(12 ; 2,00)	6		(14 ; 3,19)	18		(15 ; 4,10)	30
70 000	(8 ; 3,00)	7	160 000	(10 ; 4,00)	19	300 000	(11 ; 5,26)	31
	(10 ; 2,70)	8		(12 ; 3,68)	20		(13 ; 4,84)	32
	(12 ; 2,40)	9		(14 ; 3,41)	21		(15 ; 4,49)	33
100 000	(10 ; 3,20)	10	180 000	(10 ; 4,28)	22			
	(12 ; 2,90)	11		(12 ; 3,90)	23			
	(14 ; 2,70)	12		(14 ; 3,62)	24			

Enfin, les 33 couples (T_p , H_s) sont regroupés en 11 triplets associés à un certain flux d'énergie de la houle au large W . Dans l'hypothèse des grandes profondeurs ($h > \lambda/2$, où h est la profondeur et λ est la longueur d'onde de la houle) on a $W \propto T H^2$ (Tableau 1).

La vitesse du courant obtenue sur les 56 points de calcul de la frontière entre les plages d'Anglet et la zone draguée (section AB, Figure 1c) pour les différentes simulations fait l'objet des analyses présentées ci-après.

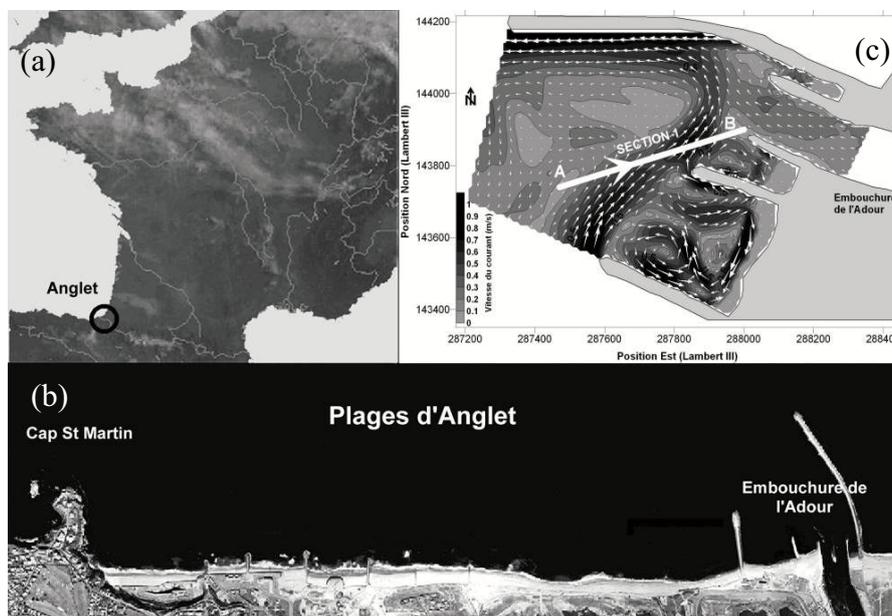


Figure 1 : (a) et (b) situation géographique du site d'étude ; (c) site et section d'étude, et exemple de résultats de simulation

3. Analyses préliminaires

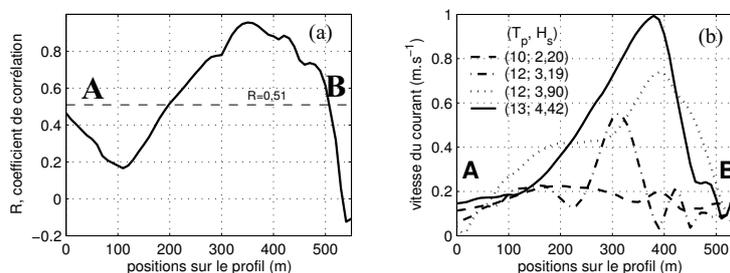


Figure 2 : (a) coefficient de corrélation entre le flux d'énergie de la houle et la vitesse du courant sur le profil ; (b) vitesses de courant sur la section 1 pour 4 climats de houle

Le coefficient de corrélation entre le flux d'énergie de la houle et la vitesse du courant a été calculé pour l'ensemble des simulations (Figure 2a). Sa valeur est significative ($R > 0,51$) entre les abscisses 200m et 500m. On remarquera d'ailleurs que cette zone fait l'objet du développement d'un courant lors des fortes houles (Figure 2b). Par contre, le coefficient de corrélation diminue aux extrémités du profil. Les vitesses de courant dans ces zones restent en effet faibles quelle que soit la houle considérée. Ces résultats viennent appuyer les constatations faites sur le développement de conditions propices à l'ensablement de l'embouchure lors des fortes houles (Landouer, 1990⁷).

4. Traitement par analyse factorielle 1D

L'analyse factorielle a essentiellement été utilisée en géophysique pour séparer la contribution spatiale de la contribution temporelle dans la variabilité des séries de

données spatiotemporelles (Lorenz, 1956⁸, Winant *et al.*, 1975⁹). La dimension temporelle n'intervenant pas dans notre cas, les 33 simulations ont été traitées par analyse factorielle afin de découpler la variabilité spatiale du courant sur le profil, de sa variabilité liée aux conditions de houle. Ce procédé permet de formuler la vitesse du courant pour une simulation n donnée de la manière suivante :

$$\vec{x}_n = \sum_{p=1}^k C_p(n) \times \vec{e}_p \quad \text{éq1}$$

\vec{x}_n contient les $k = 56$ vitesses de courant sur la section 1, $C_p(n)$ est un coefficient relatif à la simulation (donc aux conditions de houle) et \vec{e}_p est un vecteur dont chaque coordonnée représente une vitesse caractéristique du courant à une abscisse donnée de la section. D'un point de vue mathématique, \vec{e}_p et C_p sont respectivement le vecteur propre et la composante principale associés à λ_p . λ_p est la valeur propre de rang p de la matrice des corrélations symétrique réelle $\mathbf{A} = \frac{1}{N} \mathbf{X}' \mathbf{X}$ de dimension $k \times k$, où \mathbf{X} est la matrice dont les lignes correspondent aux $N = 33$ simulations et les colonnes aux $k = 56$ vitesses du courant sur la section.

4.1. Réduction du nombre de paramètres du problème

La réduction du nombre de paramètres vise à obtenir une représentation approchée du nuage des N simulations par sa projection dans un sous-espace de dimension $m < k$ en conservant un maximum d'information. Pour cela, la variance du nuage projeté sur le sous-espace doit être maximale. Ce sous-espace est engendré par les m vecteurs propres de \mathbf{A} associés aux m plus grandes valeurs propres. La variance du nuage projeté

explique alors $\frac{\sum_{p=1}^m \lambda_p}{\sum_{p=1}^k \lambda_p} \times 100$ pourcent de la variance du nuage des N simulations. Dans

ce nouvel espace de dimension m les individus s'écrivent alors :

$$\vec{x}'_n = \sum_{p=1}^m C_p(n) \times \vec{e}_p \quad \text{éq2}$$

Par la suite, C_p et \vec{e}_p seront appelés respectivement mode houle (ou coefficient de pondération) et mode spatial d'ordre p associés à la valeur propre λ_p .

5. Résultats

5.1. Résultats de l'analyse factorielle 1D

Le traitement des 33 profils de vitesse simulés par analyse factorielle 1D donne les résultats principaux suivant.

Tableau 2 : Variance expliquée par les 3 premiers modes issus de l'analyse factorielle 1D

mode d'ordre 1	mode d'ordre 2	mode d'ordre 3	Variance cumulée
90,78 %	5,49 %	1,32 %	97,61 %

Le Tableau 2 montre que la projection du nuage des simulations dans un espace de dimension 3 permet de conserver plus de 97% de la variance, le premier mode en expliquant à lui seul plus de 90%. Le problème initial à 56 paramètres peut donc être réduit à un problème à 3 paramètres tout en conservant plus de 97 % de la variance.

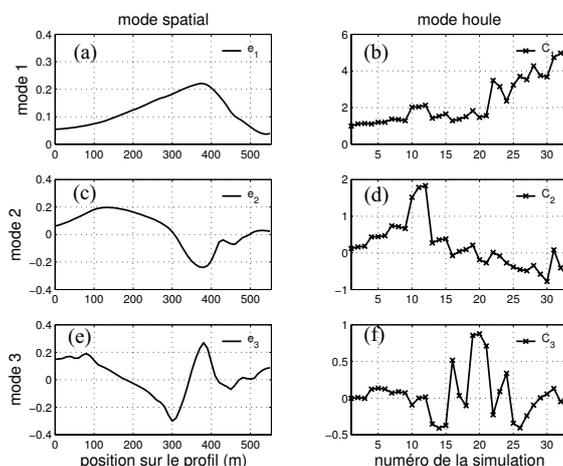


Figure 3 : (a), (c) et (e) 3 premiers modes spatiaux ; (b), (d) et (f) modes houles associés

Conformément aux interprétations des résultats de l'analyse factorielle, le 1^{er} mode spatial (Figure 3a) représente la vitesse moyenne du courant pour les 56 points de la section pour les différentes simulations. Les modes spatiaux d'ordres supérieurs (Figures 3c et 3e) représentent les fluctuations du courant autour de cette moyenne.

Les modes houles (Figures 3b, 3d et 3f) sont spécifiques de chaque condition de houle. Une valeur absolue forte indique que le mode spatial de même ordre a une grande influence sur le profil de courant réel, et inversement. On remarquera des valeurs de C_3 plus faibles que celles de C_2 , elles-mêmes plus faibles que celles de C_1 . Ainsi, même si les gammes de valeurs dans lesquelles évoluent les modes spatiaux sont semblables, leur influence sur le profil reconstruit (paragraphe 5.2) varie suivant leur ordre.

On peut déduire de cette analyse qu'une valeur forte du 1^{er} mode houle est associée à l'existence du courant responsable de l'ensablement de l'embouchure. Son influence est forte essentiellement pour des flux d'énergie de la houle supérieurs à $18.10^4 \text{ J.m.s}^{-1}$ (simulations 22 à 33). Le deuxième mode est plutôt représentatif de la largeur et de la position de la veine de courant qui se développe lors des fortes houles. Une valeur positive forte du mode houle d'ordre 2 traduit une veine de courant présente principalement dans les 300 premiers mètres de la section. Une valeur négative est quant à elle associée à la présence d'une veine de courant plus étroite avec des vitesses plus importantes et située en milieu de section. Le 3^{ème} mode pourrait enfin être associé à l'homogénéité des vitesses de courant sur la section. Un coefficient de pondération fort indiquerait un champ de vitesses hétérogènes, voire la présence de zones de recirculation.

5.2. Reconstruction des profils de courant

Chacun des 33 profils simulés a été reconstruit suivant l'éq2 à partir des 3 premiers modes ($m = 3$) obtenus par analyse factorielle (Figure 3). Rappelons que la variance du nuage de point ainsi reconstruit représente plus de 97% de la variance du nuage de point initial. La Figure 4 illustre le principe de la reconstruction à partir des 2 premiers modes.

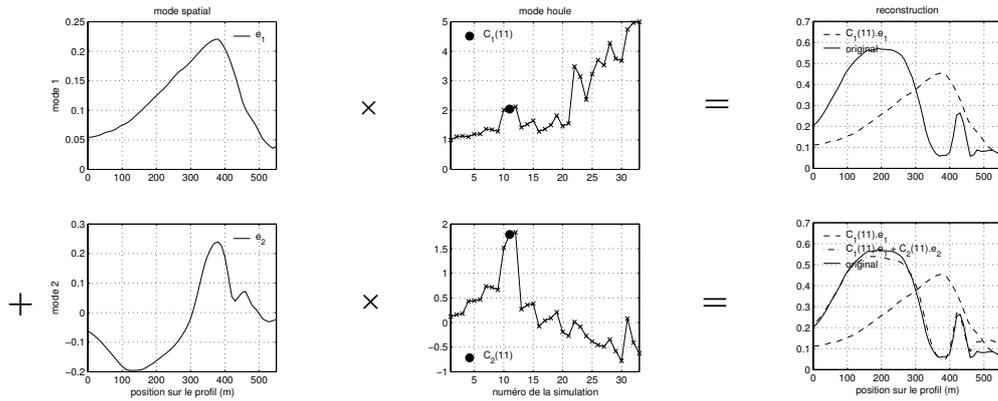


Figure 4 : reconstruction du profil de courant de la simulation 11 à partir des 2 premiers modes

5.3. Evaluation des similarités entre les profils reconstruits

La classification ascendante hiérarchique (CAH) permet de déterminer le degré de similarité entre les individus d'une population. Plus la distance entre 2 individus est élevée, plus ils sont différents.

Une CAH, utilisant la distance euclidienne et la méthode de Ward pour l'analyse de groupement, a été menée sur les profils reconstruits (Figure 5). Elle a tout d'abord permis de mettre en évidence 2 populations de profils distinctes. La population 1 regroupe les 21 premiers profils, pour lesquels le courant généré par la houle est faible ou inexistant. La population 2 regroupe les profils présentant une vitesse de courant significative dans leur partie médiane (profils 22 à 33). Ils sont associés aux flux d'énergie les plus importants.

On observe ensuite que les triplets de reconstruction associés à un même flux d'énergie sont quasi-systématiquement plus proches entre eux, qu'ils ne le sont avec des profils associés à une valeur de W différente. W est donc un paramètre particulièrement représentatif de la courantologie obtenue.

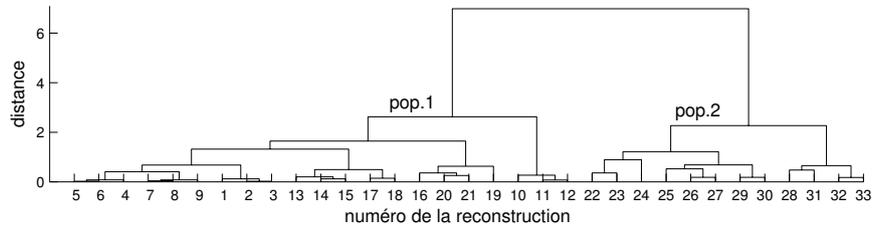


Figure 5 : classification ascendante hiérarchique effectuée sur les profils reconstruits

5.4. Reconstruction du profil de courant pour un flux d'énergie de la houle donné

La similarité des profils correspondant à un même flux d'énergie de la houle a encouragé la reconstruction d'un profil de courant unique à partir d'un flux d'énergie donné. Pour cela, nous avons reconstruit les profils de courant à partir des 3 premiers modes spatiaux issus de l'analyse factorielle, chacun étant pondéré par la moyenne des 3 modes houle des simulations appartenant au même flux d'énergie :

$$\vec{x}_W = \sum_{p=1}^3 C_p(W) \times \vec{e}_p \quad \text{éc3}$$

où \vec{x}_W est le profil reconstruit, W est le flux d'énergie et $C_p(W) = \frac{1}{3} \sum_n C_p(n)$ (Figure 6a). n représente le numéro des 3 simulations associées à l'énergie W et $C_p(W)$ sera

appelé « mode énergie d'ordre p ». Pour évaluer la qualité de la reconstruction, une erreur quadratique normalisée E_w entre le profil original et le profil reconstruit associé a été calculée pour chaque valeur de W (éq4). Plus la valeur de E_w est faible, plus la reconstruction fiable est fiable et inversement.

$$E_w = \frac{\sum_{i=1}^{56} (x_w^i - x_n^i)^2}{1/2 \left(\sum_{i=1}^{56} (x_w^i)^2 + \sum_{i=1}^{56} (x_n^i)^2 \right)} \quad \text{éq4}$$

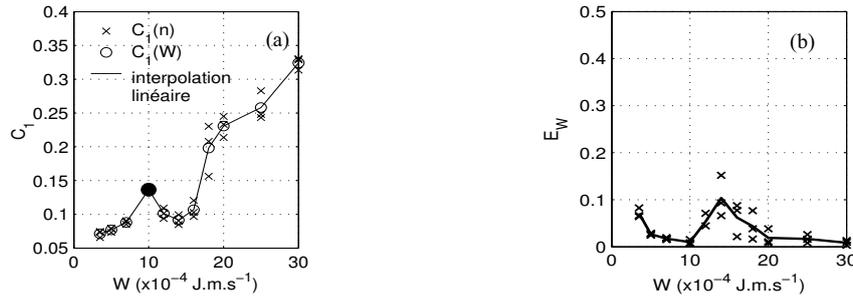


Figure 6 : (a) coefficients de pondération d'ordre 1 C_1 ; (b) erreur quadratique normalisée E_w

La Figure 6b révèle une bonne qualité de reconstruction avec une valeur de E_w inférieure à 0,1 dans la quasi totalité des cas et une moyenne de 0,04. Dans le cas de flux d'énergie de houle moyens ($12.10^4 \text{ J.m.s}^{-1} < W < 18.10^4 \text{ J.m.s}^{-1}$) ou faibles ($W < 5.10^4 \text{ J.m.s}^{-1}$) la valeur moyenne de E_w est de 0,07. Elle vaut 0,016 lorsque $5.10^4 \text{ J.m.s}^{-1} < W < 12.10^4 \text{ J.m.s}^{-1}$ ou $18.10^4 \text{ J.m.s}^{-1} < W$.

L'hydrodynamique des événements les plus énergétiques, qui sont aussi les plus importants en terme de transport sédimentaire, est donc particulièrement bien reconstruite. Les erreurs plus importantes constatées lors des houles moyennes sont liées à une hydrodynamique de transition entre une situation de courants faibles sur la zone et une situation où la veine de courant constatée lors des fortes houles est pleinement développée. Elle est marquée par un mode houle d'ordre 3 élevé mais qui varie de manière significative pour une même valeur de W , et des modes 1 et 2 faibles (Figures 3 b, d et f). E_w reste faible lorsque les coefficients de pondération énergétiques des modes 1 et/ou 2 sont significatifs, signe d'une hydrodynamique bien établie.

5.5 Validation des résultats

Un test de validation de la méthode a permis d'évaluer la qualité de la reconstruction de profils de courant non pris en compte dans l'analyse factorielle. 6 simulations appartenant chacune à un flux d'énergie différent sont retirées aléatoirement de la base des simulations et une analyse factorielle est réalisée sur les 27 simulations restantes. Les profils de courant obtenus par reconstruction grâce aux résultats de l'analyse factorielle sont ensuite comparés aux 6 simulations manquantes. Cette opération a été renouvelée pour 1000 sextuplés différents.

La valeur de E_w est inférieure à 0,1 pour 80 % des reconstructions et inférieure à 0,2 pour 96% des reconstructions (Figure 7). Ces résultats mettent en évidence la capacité de la méthode à reconstruire des profils non pris en compte dans l'analyse factorielle.

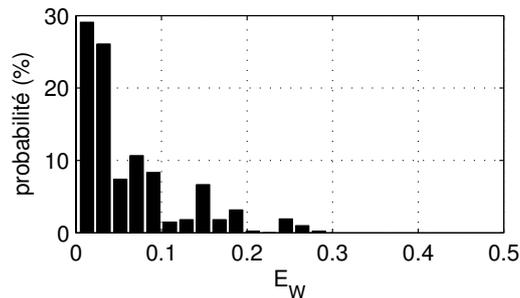


Figure 7 : répartition de l'erreur réalisée lors des reconstructions

6. Conclusion et perspectives

L'étude effectuée sur 33 simulations du courant induit par la houle à l'embouchure de l'Adour a mis en évidence les caractéristiques suivantes :

- 1 - Une analyse factorielle réalisée sur les 33 simulations a montré que la vitesse du courant sur le profil d'étude pouvait se résumer à 3 paramètres appelés modes houle.
- 2 - Une classification ascendante hiérarchique a ensuite mis en évidence un lien entre le flux d'énergie de la houle et l'hydrodynamique sur une section particulière de l'embouchure.
- 3 - De cette constatation, une méthode de reconstruction des profils de vitesses de courant sur cette section à partir du flux d'énergie de la houle a été proposée, en associant un unique mode $C_p(W)$, appelé « mode énergie », à un flux d'énergie donné.
- 4 - La qualité des reconstructions est bonne pour l'ensemble des simulations réalisées.
- 5 - Le dernier paragraphe révèle que des profils de courant non pris en compte dans l'analyse factorielle peuvent être reconstruits de manière très satisfaisante grâce à la méthode proposée. Cette capacité ouvre des possibilités intéressantes de reconstruction du profil de courant pour un flux d'énergie de la houle quelconque, par interpolation linéaire des modes énergie par rapport au flux d'énergie (Figure 6a).

Références

- 1 Dubranna J. et Maron P., (2004). Rapport d'études n°2 : Suivi et modélisation de l'évolution du dépôt de dragage et de l'embouchure de l'Adour – Impact environnemental sur le site d'Anglet. LASAGEC, 55p.
- 2 LCHF, (1975). Etude de la protection du littoral entre le Cap St Martin et l'embouchure de l'Adour. Note synthétique sur les études réalisées en nature et sur modèle réduit.
- 3 Abadie S., Brière C., Dubranna J., Maron P., Rihouey D., (2004). Etude préliminaire sur le comportement hydro-sédimentaire du littoral d'Anglet et de l'entrée du port de Bayonne, 100p.
- 4 Toleman H.L., (1999). A third generation model for wind waves on slowly varying, unsteady and inhomogeneous depths and currents, J. Phys. Oceanogr., 21, pp 782-797.
- 5 Toleman H.L., (1999). User manual and system documentation of WAVEWATCH-III version 1.18. NOAA/NWS/NCEP/OMB Technical Note 166, 110 p.
- 6 Brière C., (2005). Etude de l'hydrodynamique d'une zone côtière anthropisée, l'embouchure de l'Adour et les plages adjacentes d'Anglet, Thèse de Doctorat, Université de Pau et des Pays de l'Adour.
- 7 Landouer P.Y., (1990). Défense du littoral d'Anglet, Golfe de Gascogne : un exemple de zone à forte houle. A.I.P.C.N., Bulletin 1990, n°71, pp 40-49.
- 8 Lorenz E.N., (1956). Empirical orthogonal functions and statistical weather prediction. Scientific Report n°1, Statistical Forecasting Project, MIT, Department of Meteorology.
- 9 Winant C.D., Inman D.L. and Nordstrom C.E., (1975). Description of seasonal beach changes using empirical orthogonal eigenfunctions. Journal of Geophysical Research, 80(15), 7979-7986.