



Méthode d'analyse factorielle appliquée au suivi bathymétrique de l'embouchure de l'Adour

Philippe Maron^(a), Didier Rihouey^(b), Jean Dubranna^(b)

^(a) *Maître de Conférences, LaSAGeC - Génie Côtier,
Université de Pau et des Pays de l'Adour,
I.S.A. B.T.P., 1 allée du Parc Montaury, 64600 ANGLET,
France, E-mail: philippe.maron@univ-pau.fr, Tél: 05.59.57.44.29.*

^(b) *Doctorants LaSAGeC - Génie Côtier,
Université de Pau et des Pays de l'Adour,
I.S.A. B.T.P., 1 allée du Parc Montaury, 64600 ANGLET, France.*

Résumé:

Une base de données de 36 relevés bathymétriques réalisés entre décembre 2001 et septembre 2003 dans l'embouchure de l'Adour a été étudiée par la technique d'analyse factorielle. Couramment utilisée pour caractériser l'évolution morphodynamique des plages sableuses, cette méthode d'analyse statistique reste rarement employée dans les études de données bathymétriques d'estuaires. Cette étude montre l'intérêt de l'analyse factorielle pour caractériser la dynamique sédimentaire d'une embouchure soumise à l'impact anthropique. L'analyse factorielle permet de réaliser une forte compression des données et simplifie l'analyse du comportement hydrosédimentaire de l'embouchure. Ainsi, Les premiers résultats obtenus ont permis de mettre en évidence des comportements significatifs et laissent entrevoir le développement d'un modèle morphodynamique empirique moyen terme.

Abstract:

A bathymetric data set of the Adour river mouth, composed from 36 surveys for dates between December 2001 and September 2003, were studied by using Empirical Orthogonal Function (EOF) analysis. EOF has become an established technique for investigating seabed level fluctuations but the use of EOF is currently scarce for estuary studies. This study shows the efficiency of this statistical method to characterize the behavior of a river mouth subjected to dredging activities. EOF consists in an important data compression which simplify the analysis of the river mouth. Hence, The first results underscored significant behavior and would allow to develop an empirical medium-term morphodynamic model.

1.Introduction

La tendance à l'ensablement de l'embouchure de l'Adour est un problème récurrent rencontré par les autorités locales et nécessite de coûteux travaux de dragage afin de conserver une profondeur suffisante du chenal d'accès au port de Bayonne.

Les constructions de la digue nord en 1966 et de la digue sud en 1977 n'ont pas résolu les problèmes d'ensablement rapide de l'embouchure pendant les événements de tempête. En 1999, les Services Maritimes de la DDE ont décidé de creuser une "fosse de garde" au sud de l'embouchure afin de servir d'espace tampon et de réduire la vitesse d'ensablement du chenal.

Toutefois, même si le phénomène d'ensablement du chenal de navigation a diminué considérablement, deux campagnes de dragage par an restent nécessaires pour maintenir l'efficacité du système fosse de garde - chenal de navigation.

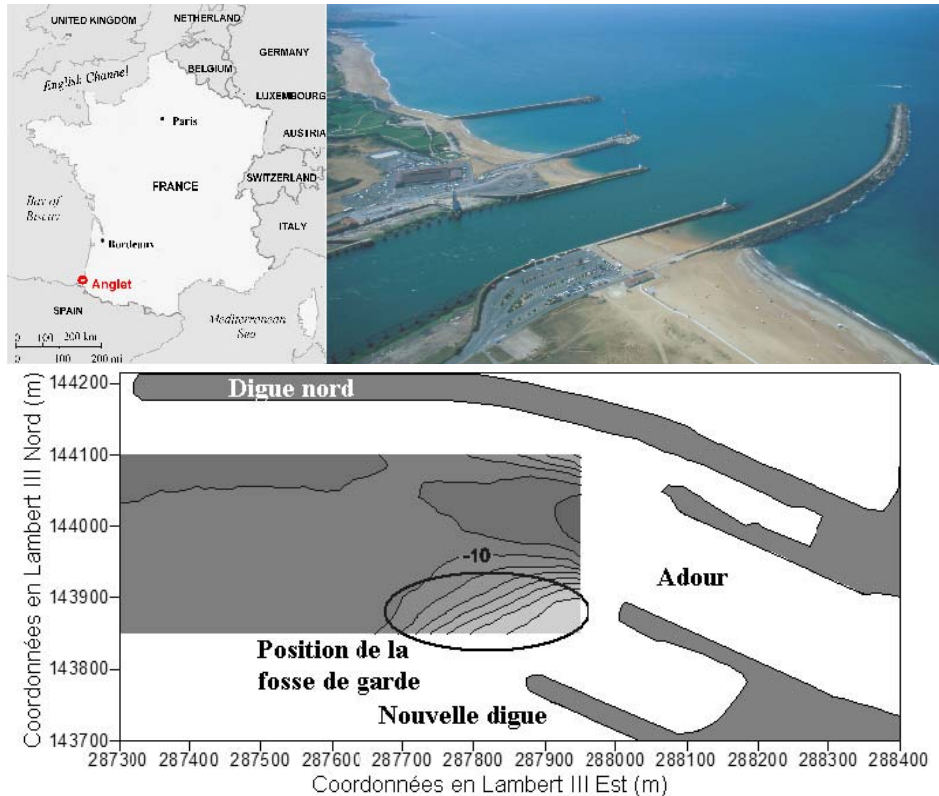


Figure 1. Localisation de la zone d'étude et bathymétrie moyenne

L'embouchure de l'Adour marque la frontière entre la côte landaise et la côte basque. Situé à l'extrême Sud-ouest du Golfe de Gascogne (Figure 1), ce site est caractérisé par l'un des régimes de houle les plus énergétiques de France. La hauteur de houle significative (H_{sig}) est de l'ordre de 2m en hiver, avec des périodes de pic correspondant (T_{pic}) de l'ordre de 10s. Les marées sont de type mésotidal avec un marnage maximum de 4,8m. Enfin, le débit moyen de l'Adour est de l'ordre de $330 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$; en période de crue, il peut atteindre des valeurs de l'ordre de $1500 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$.

Depuis trois ans, l'équipe Génie Côtier du Laboratoire des Sciences Appliquées au Génie Civil (LaSAGeC) s'est vu confier l'étude du comportement hydrosédimentaire du littoral d'Anglet et de l'entrée du port de Bayonne. Cet article présente l'intérêt de l'utilisation d'une analyse factorielle pour caractériser les évolutions spatio-temporelles de l'embouchure de l'Adour entre décembre 2001 et septembre 2003.

Les méthodes d'analyse factorielle sont couramment utilisées pour caractériser l'évolution morphodynamique des plages sableuses, mais leur emploi reste rare pour l'étude de données bathymétriques d'estuaires. Cuadrado et Perillo (1997) ont analysé le chenal de El Toro dans l'Estuaire de Bahia Blanca (Argentine), afin d'expliquer les phénomènes d'accumulation et

d'érosion. Horrillo-Caraballo et al.² (2002) ont mis en évidence les périodes de modifications morphodynamiques de l'estuaire de Humber (UK) à l'échelle pluri-décennale. Buonaiuto³ (2003) a présenté les modifications morphodynamiques de Shinnecock Inlet (Long Island, USA) et mis en évidence les redistributions de sédiments dues à la modification d'orientation du chenal. Récemment, Rihouey et Maron⁴ (2003) ont suggéré l'utilité de l'analyse factorielle pour étudier les zones de dragage et de clapage.

2.Présentation des données

Une série temporelle de 36 relevés bathymétriques effectués entre décembre 2001 et septembre 2003, sur une zone délimitée dans sa diagonale par les points (287300E, 143850N) et (287950E, 144100N) en coordonnées Lambert III (Figure 1) a été analysée selon la méthode d'analyse factorielle 1D. Quatre campagnes de dragages ont été réalisées sur la zone pendant la période d'investigation (Tableau 1).

Tableau 1. Dates des mesures et des campagnes de dragage

Dates	Evénements	Dates	Evénements	Dates	Evénements
10/12/2001	Mesures	06/11/2002	Mesures	22/07/2003	Mesures
11/12/01	Fin Dragage	19/11/02	Fin Dragage	29/07/2003	Mesures
08/02/2002	Mesures	11/12/2002	Mesures	06/08/2003	Mesures
16/02/02	Début Dragage	17/02/2003	Mesures	13/08/2003	Mesures
26/02/2002	Mesures	17/03/2003	Mesures	20/08/2003	Mesures
04/03/2002	Mesures	07/04/2003	Mesures	21/08/2003	Mesures
07/03/2002	Mesures	05/05/2003	Mesures	24/08/03	Début Dragage
15/03/02	Fin Dragage	07/05/03	Début Dragage	27/08/2003	Mesures
25/03/2002	Mesures	12/05/2003	Mesures	01/09/2003	Mesures
10/07/2002	Mesures	16/05/2003	Mesures	03/09/2003	Mesures
02/09/2002	Mesures	22/05/2003	Mesures	04/09/2003	Mesures
02/10/2002	Mesures	27/05/2003	Mesures	05/09/03	Fin Dragage
14/10/02	Début Dragage	02/06/2003	Mesures	15/09/2003	Mesures
21/10/2002	Mesures	05/06/03	Fin Dragage	16/09/2003	Mesures
29/10/2002	Mesures	18/06/2003	Mesures	22/09/2003	Mesures

Des modèles numériques de terrain (M.N.T.) ont été préalablement générés à l'aide du Système d'Information Géographique (S.I.G.) "Surfer 7" (Golden Software inc.⁵). Ainsi, les données initiales ont été interpolées par krigeage en utilisant des variogrammes exponentiels ajustés aux variogrammes expérimentaux au sens des moindres carrés. Le pas de discrétisation spatiale de ces M.N.T. est de 10m suivant l'axe Lambert III-Est et de 5m selon l'axe Y Lambert III-Nord.

3.Méthodes d'analyse factorielle

La méthode consiste à exprimer la profondeur h par des combinaisons linéaires de fonctions spatiales et de fonctions temporelles.

Considérons un échantillon de N_t profils comportant chacun N_y profondeurs $h(y_i, t_k)$, avec $1 \leq i \leq N_y$ et $1 \leq k \leq N_t$. L'objectif de l'analyse factorielle 1D est d'exprimer les données sous la forme:

$$h(y_i, t_k) = \sum_p C_p(t_k) e_p(y_i) \quad (1)$$

où les e_p sont les modes spatiaux, C_p les modes temporels correspondant, et p le nombre de modes pris en compte.

Les coefficients de la "matrice des corrélations" \mathbf{A} sont donnés par la relation:

$$a_{i,j} = \frac{1}{N_t} \sum_{k=1}^{N_t} h(y_i, t_k) \cdot h(y_j, t_k) \quad (2)$$

\mathbf{A} est une matrice $N_y * N_y$ symétrique réelle. Elle est donc diagonalisable dans \mathbb{R} , possède N_y valeurs propres λ_p avec $1 \leq p \leq N_y$ et les vecteurs propres e_p correspondant aux valeurs propres λ_p satisfont l'équation matricielle suivante :

$$\mathbf{A}e_p = \lambda_p e_p \quad (3)$$

La trace de la matrice \mathbf{A} correspond à l'inertie du nuage de points. Ainsi, chaque valeur propre de \mathbf{A} , élément de la matrice diagonalisée, représente un certain pourcentage de l'inertie des données initiales.

Enfin, les coefficients de pondération C_p , ou modes propres temporels, sont donnés par :

$$C_p(t_k) = \sum_{i=1}^{N_y} h(y_i, t_k) e_p(y_i) \quad (4)$$

4.Résultats

4.1.Représentativité des modes sur toute la zone d'étude

Le premier mode représente la bathymétrie moyenne au cours de la période d'étude. Les modes d'ordres supérieurs représentent quant à eux les variations par rapport au profil moyen et sont liés aux zones où les variations bathymétriques sont les plus importantes.

L'analyse a été réalisée sur des profils Sud-Nord espacés de 10m. En moyenne 99,74% de l'inertie est expliquée par le premier mode. Les second et troisième modes représentent respectivement en moyenne 58,98% et 17,03% de la variance résiduelle. Le quatrième mode ne représente quant à lui que 8,68% de la variance et sera négligé dans la suite de l'étude.

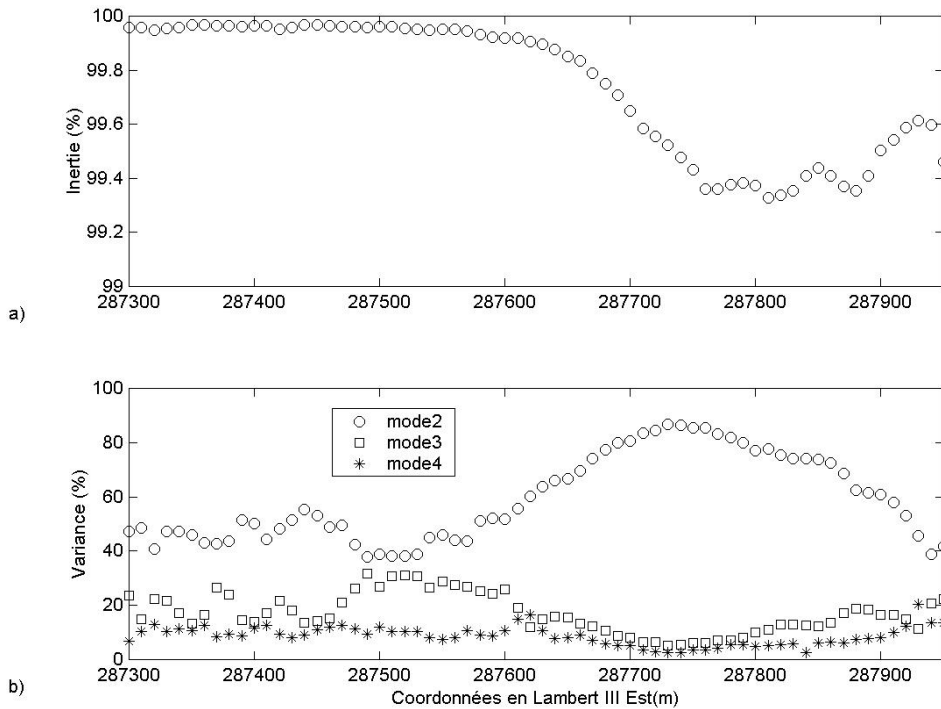


Figure 2. Contributions des différents modes à l'inertie totale et à la variance suivant la position du profil Est-Ouest
 a) contribution du premier mode à l' inertie totale
 b) contribution des modes 2, 3 et 4 à la variance

L'inertie représentée par le premier mode varie fortement selon la position Est du profil d'étude (Figure 2.a.). Pour des profils aux abscisses inférieures à 287630E, la contribution du premier mode représente plus de 99,9% de l'inertie totale, indiquant une bathymétrie stable. Pour des profils aux abscisses supérieures, la contribution du premier mode décroît de manière importante et ne représente plus que 99,3 à 99,6% de l'inertie totale. Les variations bathymétriques autour de la moyenne sont donc plus marquées dans cette zone.

D'autre part, la contribution du second mode à la variance (Figure 2.b.) croît de 50% à 85% entre 287600E et 287750E avant de diminuer jusqu'à 40% pour 287940E. L'importance du troisième mode suit une évolution inverse, diminuant de 25% à 5%, puis croît jusqu'à 20% pour les mêmes abscisses. La suite de l'étude présente une interprétation des résultats de l'analyse factorielle en 287740E, profil où les fluctuations bathymétriques représentées par le second mode sont les plus importantes.

4.2. Analyse du profil en 287740E

4.2.1. Analyse statistique classique

L'enveloppe (Figure 3.a.) est calculée à partir des valeurs maximales et minimales mesurées en chaque point durant la période d'étude. Elle met en évidence l'amplitude maximale des variations bathymétriques de ce profil.

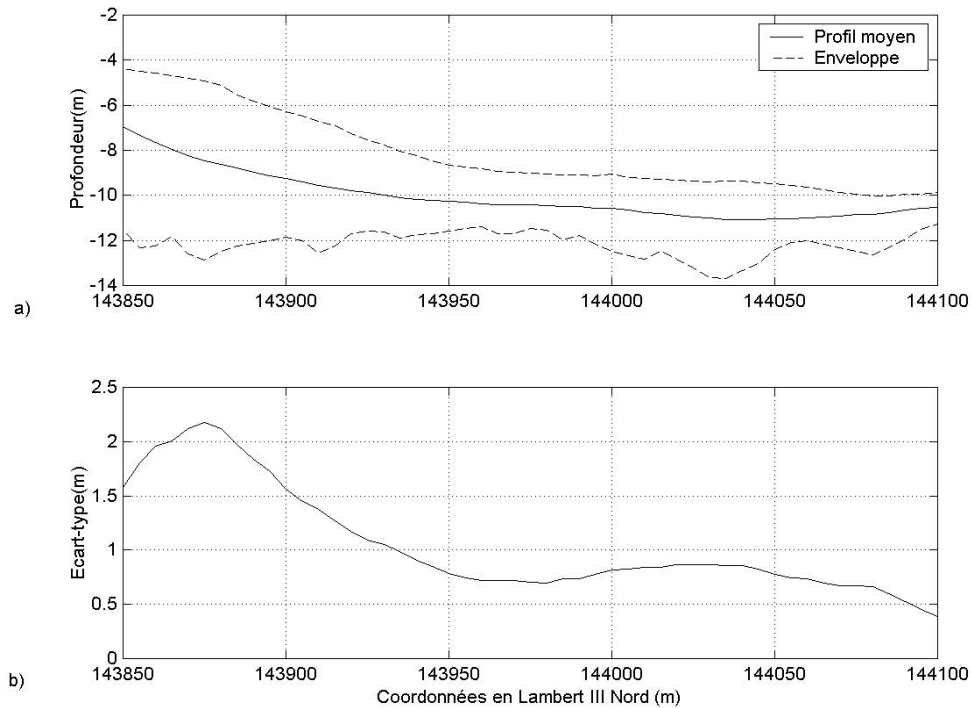


Figure 3. Résultat statistique en 287740E (Lambert III)

Les amplitudes les plus importantes sont enregistrées au droit de la fosse de garde où elles peuvent atteindre jusqu'à 8m. De même, cette zone est caractérisée par le plus fort écart-type du profil (Figure 3.b). La zone située entre 144000N et 144050N, correspond au chenal de navigation. Elle présente également des variations de profondeur importantes, de l'ordre de 3m, avec un écart-type de 0,8m. Ainsi, le chenal est maintenu à une profondeur suffisante pour permettre une accessibilité aux navires ayant des tirants d'eau inférieurs à 7m.

4.2.2. Analyse factorielle 1D

Le tableau 2. montre les valeurs des contributions à l'inertie totale de chacun des modes. On constate que 99,93% de l'inertie est prise en compte par les deux premiers modes, ce qui est considérable par rapport aux valeurs couramment trouvées dans la littérature. Le premier mode qui représente la bathymétrie moyenne au cours de la période d'étude, explique à lui seul 99,48% de l'inertie initiale. Le second mode représentent 86,27% des variations autour de cette moyenne. Sur ce profil, les troisième et quatrième modes ont des valeurs négligeables.

Ainsi, l'analyse factorielle sur ce profil permet de condenser les informations contenues dans 36 levés bathymétriques en celles contenues dans seulement deux modes tout en gardant une représentativité significative de 99,93%.

Tableau 2. Inertie et variance expliquées par les modes issus de l'analyse factorielle

Modes	Contribution à l'inertie totale	Inertie cumulée	Contribution à la variance totale	Variance cumulée
1	99.48 %	99.48 %		
2	0.45 %	99.93 %	86.27 %	86.27 %
3	0.03 %	99.96 %	5.60 %	91.87 %
4	0.01 %	99.97 %	2.53 %	94.40 %

Sur la base des deux premiers modes, la profondeur $h(y,t)$ peut être reconstruite (Figure 7.) en utilisant l'équation :

$$h(y,t) = C_1(t).e_1(y) + C_2(t).e_2(y) \quad (5)$$

Ainsi, le premier mode spatial e_1 (Figure 4.a.) ne prenant que des valeurs négatives, une augmentation de l'amplitude de la pondération temporelle C_1 (Figure 4.b.) correspond alors à une augmentation de la profondeur, et inversement. On peut noter une diminution de la pondération temporelle entre les campagnes de dragages (1) et (2), (2) et (3), correspondant à un ensablement de l'embouchure. Ce phénomène n'est pas visible entre les campagnes (3) et (4), car la campagne (4) a été programmée afin d'anticiper l'ensablement du chenal lors des tempêtes automnales. De plus les pentes correspondant à ces décroissances sont plus importantes durant les périodes d'hiver que d'été ce qui correspond à des ensablements plus rapides en hiver qu'en été.

De plus, une forte corrélation linéaire (-97,3%) existe entre l'évolution temporelle du volume de sable de la zone d'étude (Figure 5.) par rapport à une profondeur de -17m et la variation de l'amplitude de la pondération temporelle C_1 du premier mode (Figure 4.b.). Ainsi le suivi bathymétrique de ce seul profil permet d'avoir une idée significative du taux d'ensablement de l'ensemble de la zone d'étude.

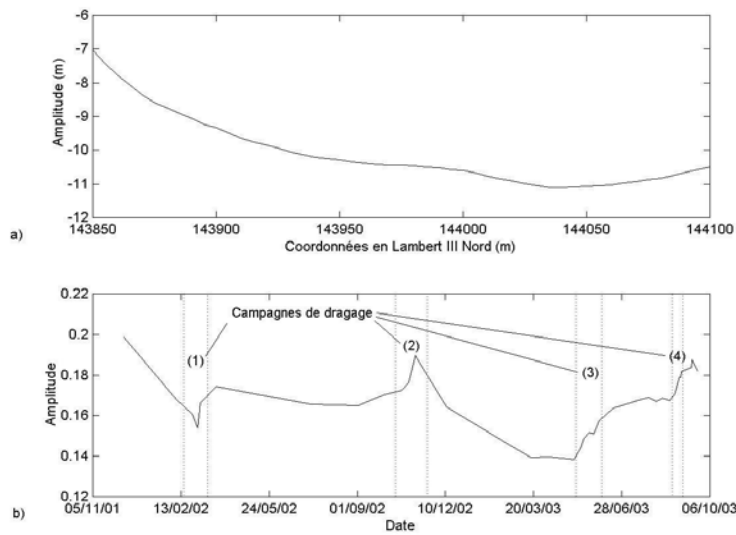


Figure 4 Premiers modes issus de l'analyse factorielle 1D en 287740E
 a) mode spatial e_1
 b) pondération temporelle C_1
 (Les campagnes de dragage sont indiquées par les traits verticaux pointillés)

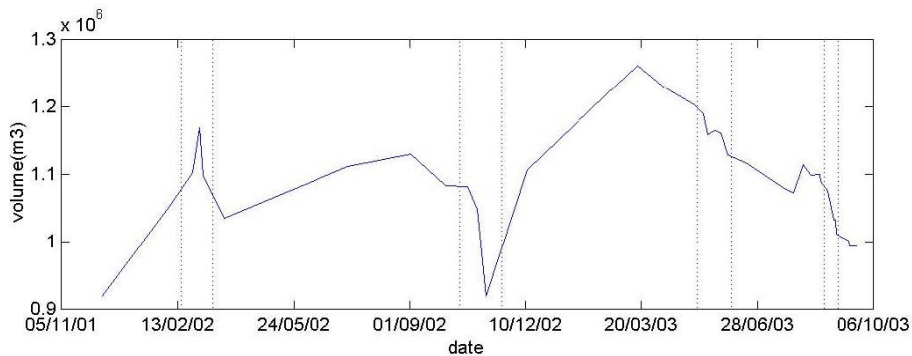


Figure 5. Evolution du volume de sable de la zone d'étude par rapport à une profondeur de $-17m$

Le second mode, qui représente environ 86% des variations autour de la bathymétrie moyenne, présente une amplitude maximale (Figure 6.a.) à l'emplacement de la fosse de garde. On peut noter un accroissement de la pondération temporelle C_2 du second mode entre deux campagnes de dragages, ainsi qu'une décroissance forte durant les campagnes de dragage (Figure 6.b.). L'accroissement de C_2 entre deux campagnes présente une pente plus importante durant les périodes d'hiver que d'été.

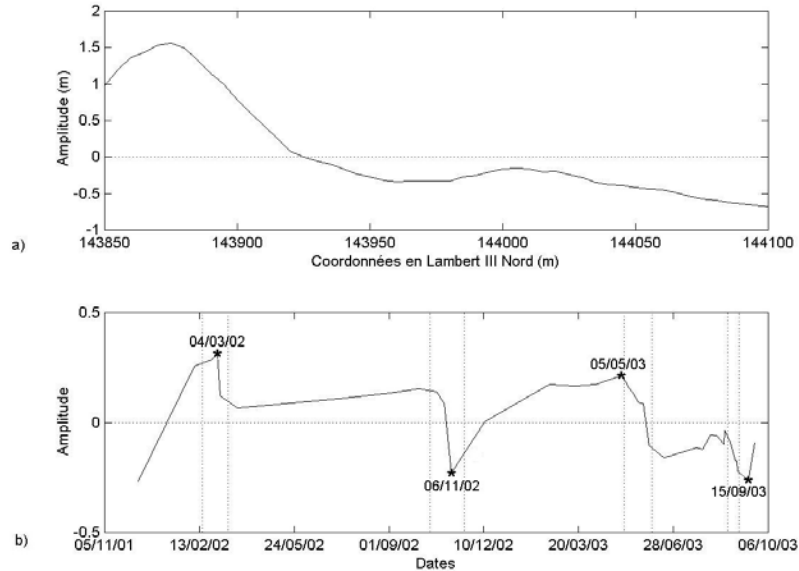


Figure 6. Seconds modes issus de l'analyse factorielle 1D en 287740E

a) mode spatial e_2

b) pondération temporelle C_2

(Les campagnes de dragage sont indiquées par les traits verticaux pointillés)

La contribution du second mode à la reconstruction du profil $h(y,t)$ est représentée par le produit du mode spatial par la pondération temporelle $C_2(t).e_2(y)$. La pondération temporelle C_2 présente deux extrema positifs et deux extrema négatifs. Au droit de la fosse de garde, (où le mode spatial est positif), les deux extrema positifs (Figure 6.b.), le 04/03/02 et le 05/05/03 correspondent à des situations d'ensablements importants de cette zone (Figure 7.a.), tandis que les extrema négatifs (Figure 6.b.), les 06/11/02 et 15/09/03 correspondent au contraire à des profondeurs maximales obtenues après dragage (Figure 7.b.).

On peut également noter que suite à la première campagne de dragage, la pondération temporelle est restée positive ce qui signifie que la profondeur après dragage était moins importante que la profondeur moyenne représentée par le mode 1 et donc que la fosse de garde était inexistante. De même, le fait que la pondération temporelle soit encore négative avant la dernière campagne de dragage, montre que la profondeur était supérieure à la moyenne et donc que le dragage était plus préventif que nécessaire.

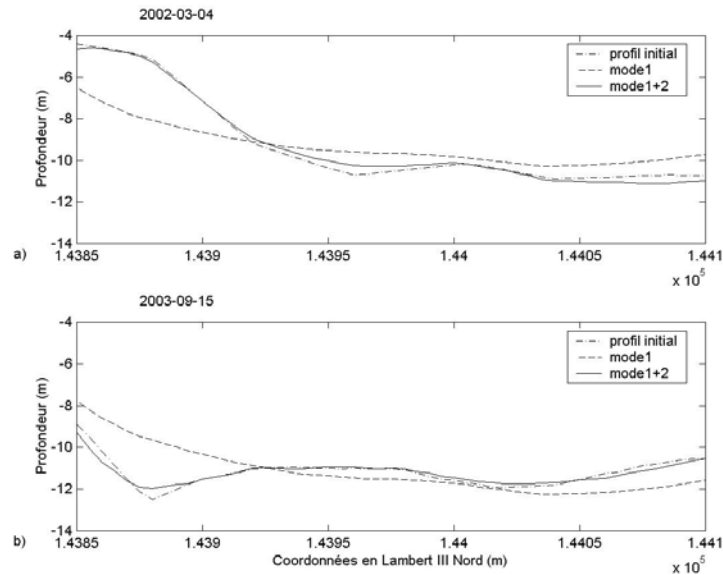


Figure 7. Influence des modes dans la reconstruction des profils
 a) contributions du mode 1 seul et de la combinaison des modes 1 et 2 au 04/03/02
 b) contributions du mode 1 seul et de la combinaison des modes 1 et 2 au 15/09/03

5. Conclusions

Un suivi régulier de l'embouchure de l'Adour a permis d'obtenir une série de 36 relevés bathymétriques sur une période allant de décembre 2001 à septembre 2003. L'analyse factorielle effectuée sur ces données a permis d'obtenir une forte compression des données. Les deux premiers modes propres obtenus contiennent à eux seuls 99,93% de l'information initiale, permettant une analyse plus simple du fonctionnement hydrosédimentaire de l'embouchure.

Une corrélation de $-97,3\%$ a été calculée entre le premier mode temporel et l'évolution du volume de sable contenu dans la zone d'étude, montrant ainsi que le suivi d'un seul profil situé au droit de la fosse de garde permet d'obtenir une information significative sur le taux d'ensablement cette zone.

Il a été montré que les variations bathymétriques les plus importantes se situaient dans la partie Est de la zone d'étude.

Enfin l'examen du second mode temporel a permis d'obtenir des informations sur la nécessité ou l'efficacité d'une campagne de dragage, mais aussi sur l'évolution du site en fonction des saisons.

Ainsi cette méthode statistique présente un intérêt certain dans l'analyse des évolutions d'estuaires ou d'embouchures.

6. Perspectives

L'analyse des forçages naturels (houle, marées, débit) et leurs corrélations avec les évolutions morphologiques est la prochaine étape pour caractériser l'évolution morphodynamique de l'embouchure de l'Adour. L'analyse canonique des corrélations, ayant permis de montrer les corrélations entre les évolutions bathymétriques de plage et les forçages de houle (Rihouey et al., 2003), cette approche sera utilisée pour développer un modèle morphodynamique empirique moyen terme.

7. Remerciements:

Cette étude est partiellement financée par le service travaux maritimes de la DDE de Bayonne que nous tenons à remercier également pour l'aide à la collecte des données.

8. Références:

1 Cuadrado D. G., Perillo G. M. E. (1997). Principal component analysis applied to geomorphologic evolution. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **44**(4), 411-419.

2 Horillo-Caraballo J. M., Reeve D., et Li B. (2002). Eigenfunction analysis of complex estuary morphology. *Hydroinformatics 2002*, Cardiff, 777-784.

3 Buonaiuto F. S. (2003). Principal component analysis and morphology change at Shinnecock inlet, N.Y. *Coastal Sediments' 03*, Clearwater Beach, Florida, USA, CD-Rom.

4 Rihouey D., Maron P. (2003). Decadal morphological behaviour from long-term bathymetric surveys along the beaches of Anglet using eigenfunction analysis. *Coastal Sediments' 03*, Clearwater Beach, Florida, USA, CD-Rom.

5 Surfer User's guide (1999), 3^e édition, Golden Software Inc., 619 p.

6 Rihouey D., Certain R., Desmazes F., Maron Ph., Michel D., Stepanian A., Levoy F. (2003). Développement d'outils géostatistiques sur la base des données expérimentales des sites ateliers du PNEC. 9^e Congrès Français de Sédimentologie, Bordeaux, 425-426