

**IMPACT DE L'ELEVATION DU NIVEAU MARIN SUR L'EVOLUTION FUTURE
D'UN CORDON LITTORAL LAGUNAIRE : UNE METHODE D'EVALUATION
Exemple des étangs de Vic et de Pierre Blanche (littoral méditerranéen, France)**

par

Paul Durand et Hugues Heurtefeux

Avec 8 figures et 1 tableau

Résumé

Une cartographie prévisionnelle de l'évolution du système cordon littoral – lagune de Vic et de Pierre Blanche a été réalisée dans la cadre d'un programme lancé par le Conservatoire du Littoral. Elle a reposé sur un scénario d'élévation du niveau marin de + 22 cm d'ici 2050. L'originalité de la démarche employée tient dans l'association de deux types d'approche. D'une part, sur la face externe du lido, la position future de la ligne de rivage a été extrapolée par régression linéaire à partir des données d'évolution historique du trait de côte depuis 1937, obtenues par photo-interprétation. D'autre part, sur la face interne du lido, les pertes en surfaces qu'entraînerait une simple élévation statique du plan d'eau lagunaire de 22 cm ont été simulées au moyen d'un logiciel de S.I.G, à partir de levés topographiques de précision infra-centimétrique réalisés au GPS différentiel. En dépit des incertitudes inhérentes à toute démarche de ce type, il ressort de notre étude que le lido subirait très probablement des pertes en surface non négligeables (estimées à 15 ha) sur sa face interne et que, parallèlement, il reculerait en roulant sur lui-même de plusieurs dizaines de mètres (jusqu'à 70 m dans sa partie centrale). Il poursuivrait en cela une évolution entamée depuis plusieurs siècles, et observée sur des littoraux similaires dans un contexte d'élévation rapide du niveau de la mer. En outre, il serait de plus en plus souvent morcelé par l'ouverture de brèches lors des tempêtes et risquerait de se

transformer à terme en îles-barrières, séparées les unes des autres par des passes permanentes reliant la mer aux étangs situés en arrière.

An evaluation method of the impact of relative sea-level rise on a barrier-lagoon system.

Example of the Vic and Pierre-Blanche area (Hérault, France).

Assuming a 22 cm sea level rise by 2050, a map was elaborated, which shows the expected changes which probably will affect the barrier-lagoon system in the Vic and Pierre-Blanche area. The research was supported by the French *Conservatoire du littoral* and the Procter and Gamble Foundation. According to the linear regression method and using aerial photographs dating back to 1937, the shoreline position in 2050 was predicted. The barrier surface loss due to a 22 cm elevation of the lagoon water level was calculated using a SIG software and accurate topographic data supplied by a GPS survey with sub-centimetric precision. As a result, it is forecasted -within the limits inherent to the methods which were used- that a landward migration of the shoreline over a distance up to 70 m will occur by 2050 as well as a loss of the barrier surface of about 15,76 hectares. Such an evolution which started several centuries ago is likely to be enhanced by the expected sea level rise. The present continuous barrier probably would be transformed in a string of islands through inlet opening.

Auswirkungen des relativen Meeresspiegelanstieges auf die zukünftigen Entwicklung der Nehrung einer Lagune. Eine Bewertungsmethode am Beispiel des Ortes von Vic und Pierre-Blanche (Hérault, France)

Eine vorausschauende Kartographie der Entwicklung der Küstenlinie – der Lagunen von Vic und von Pierre Blanches – ist im Rahmen eines Programms verwirklicht worden, das durch die Küstenschutzinstitution (le Conservatoire du Littoral) angeregt wurde. Sie beruht auf einem Szenario der Erhöhung des Meeresspiegels von 22 cm innerhalb der nächsten 50 Jahre bis 2050. Die Originalität des angewandten Vorgehens besteht in der Verbindung von zwei verschiedenen Konzepten. Einerseits ist auf der Seeseite des Lido die künftige Position der Uferlinie durch linearen Rückgang anhand der von Daten der historischen Entwicklung des Küstenzuges seit 1937 extrapoliert worden, die durch

Photointerpretation erhalten wurden. Andererseits sind auf der Binnenseite des Lido die Oberflächenverluste, die eine einfache statische Erhöhung der Lagunenwasserfläche von 22 cm bewirken würde mit Hilfe einer GIS-Software simuliert worden, ausgehend von topographischen Aufnahmen von einer Genauigkeit von weniger als 1 cm Abweichung, die mit einem differentiellen GPS verwirklicht wurden. Ungeachtet der Unsicherheiten, die jedem Vorgehen diesen Typs inhärent sind, geht aus unserer Studie hervor, dass der Lido sehr wahrscheinlich nicht unerhebliche Flächenverluste von schätzungsweise 15,76 ha auf seiner Lagunenseite erfahren würde und dass er parallel zurückgehen würde, indem er sich selbst über etliche Meter verlagern würde (bis zu 70 m in seinem zentralen Teil). Er würde damit eine Entwicklung durchlaufen, die vor mehreren Jahrhunderten begonnen hat und die in den USA bei vergleichbaren Küstenstreifen im Rahmen einer schnellen Erhöhung des Meeresspiegels beobachtet wurde. Außerdem besteht die Gefahr, dass der Lido durch die Öffnung zusätzlicher Breschen bei Stürmen unterbrochen wird und sich mit der Zeit in einem von mehreren beständigen Tidedurchlässen durchbrochen Barriersystem umwandelt.

Introduction

L'élévation actuelle du niveau marin, estimée à 13-15 cm en moyenne au cours du 20^e siècle, et sa possible accélération au cours du 21^e siècle en liaison avec le réchauffement climatique (I.P.C.C., 2001), est un phénomène qui préoccupe de plus en plus les gestionnaires en charge des espaces littoraux. Ce phénomène se traduirait en effet probablement par un accroissement des risques de submersion et d'érosion sur les espaces littoraux bas (PASKOFF, 1998 et 2001, I.P.C.C., 2001).

Ainsi en France, le Conservatoire du Littoral, organisme public qui a pour vocation de mener une politique foncière de sauvegarde de l'espace littoral et de respect des sites naturels, a lancé au début de l'année 2003, en coopération avec la *fondation Procter et Gamble*, un vaste programme d'analyse prévisionnelle des impacts de l'élévation future du niveau de la mer sur les terrains dont il est propriétaire (CHENAT, 2003). Dans cette optique, dix sites pilotes ont été sélectionnés pour faire l'objet d'une cartographie prévisionnelle de la position du trait de côte et des espaces susceptibles d'être submergés de manière permanente en arrière d'elle à échéance de l'année 2050. La valeur d'élévation du niveau de la mer à prendre en compte dans les prévisions a été fixée par le Conservatoire à + 22 cm, ce qui correspond au haut de la fourchette des estimations proposées dans le dernier rapport du I.P.C.C. (I.P.C.C., 2001) pour 2050 (fourchette d'estimations de 0,05 à 0,32 m).

Le site des étangs de Vic et de Pierre-Blanche est un de ces dix sites pilotes. Il couvre un linéaire côtier de 7300 mètres, entre les Aresquiers et l'île de Maguelonne, où le Conservatoire possède 1354 ha. Situés à une dizaine de kilomètres au sud de Montpellier (fig. 1), ces étangs littoraux font partie du complexe lagunaire palavasien, qui comprend schématiquement deux lignes d'étangs séparés par le Canal du Rhône à Sète. L'étang de Pierre Blanche, dit de première ligne, a une forme allongée et n'est isolé de la mer que par un mince cordon littoral de quelques dizaines de mètres de large ; l'étang de Vic, quant à lui, est dit de seconde ligne et se situe au nord du précédent. La formation de ces étangs remonte à la fin de la transgression holocène (vers 5500 B.P. dans la région), le rattachement à la terre de l'île de Maguelone s'étant même fait ultérieurement, au cours de l'antiquité. Ces deux étangs ont une tranche d'eau faible vis-à-vis de leur superficie : la bathymétrie est de quelques décimètres et n'excède que très rarement le mètre. Ce sont donc des lagunes qui ont été gagnées sur la mer par la construction progressive d'un lido meuble.

Sur ce site, le travail d'analyse prévisionnelle a comporté deux étapes. D'une part, il s'est appuyé les données d'évolution passée du rivage au cours des dernières décennies, qui ont été extrapolées dans le futur selon la méthode de la régression linéaire, la plus fréquemment utilisée dans ce type d'approche et considérée comme la moins aléatoire (LEVOY & LARSONNEUR, 1993 ; WRAY et al, 1995 ; CROWELL et al, 1997 ; SALOMON & PRAT, 1997 ; DOUGLAS et al, 1998 ; DOUGLAS & CROWELL, 2000 ; DURAND, 1999, 2001 ; FENSTER et al, 2001 ; SABATIER, 2001). D'autre part, les prévisions ont tenu compte de l'élévation statique du plan d'eau lagunaire qui serait induite par la hausse du niveau marin : les pertes en surface sur la face interne du lido ont été simulées, selon le principe de la submersion passive, grâce à l'exploitation sous un logiciel de S.I.G. d'environ 8000 levés topographiques de haute précision, réalisés au moyen d'un GPS différentiel.

L'association de ces deux méthodes constitue l'originalité de la démarche employée ici, mais elle pose un certain nombre de problèmes qui tiennent à la fois aux limites de l'extrapolation par régression linéaire et à la difficulté de combiner ces résultats avec les simulations réalisées à partir des levés topographiques. En conséquence, le présent article insiste tout particulièrement sur les aspects méthodologiques liés à l'analyse prévisionnelle. Il est organisé en quatre temps : (1) une présentation morphosédimentaire du site ; (2) une analyse par photo-interprétation de l'évolution du rivage au cours du 20^{ème} siècle, afin de dégager des valeurs précises d'évolution pouvant être extrapolées dans le futur ; (3) une présentation critique des méthodes prévisionnelles retenues, régression linéaire et submersion passive ; (4) une mise en parallèle des résultats obtenus avec les réponses face à l'élévation du niveau marin observées dans le passé sur des littoraux similaires.

1. Présentation morphosédimentaire du site

1.1. Morphologie et granulométrie du cordon littoral

Le lido des étangs de Vic et de Pierre-Blanche est formé d'une étroite langue de sable de faible altitude (fig. 2). Ainsi, la largeur du lido n'excède pas 320 m et elle est seulement de 70 m dans sa partie la plus étroite. Les altitudes sont faibles, au maximum de 2,5 m NGF ; la partie haute du cordon

ne comporte pas d'avant-dune mais est souvent occupée par des nebkas buissonnantes couvertes d'oyats (*Ammophila arenaria*, fig. 3).

La pente moyenne de la plage émergée fluctue fortement selon les secteurs, entre 0,7 % dans les secteurs exposés à la submersion et marqués par la présence de brèches du fait de leur faible altitude globale (secteurs situés à environ 1 m N.G.F) et 5,2 % au maximum sur les secteur aménagés avec présence d'un ouvrage de protection en dur. L'avant-plage a, quant à elle, une pente moyenne supérieure à 3 % et comporte deux barres. Elle est, en outre, caractérisée par la présence de grès infralittoraux qui apparaissent dès les fonds de 8 m (fig. 3).

La granulométrie du cordon littoral est caractérisée par un déficit relatif en matériel sédimentaire fin (fig. 3). En effet, de nombreux galets viennent se mélanger au sable. Ils sont même quasi-exclusifs à l'extrémité occidentale du lido, sur environ 600 m de côte. S'ensuit une zone de transition sur environ 3000 m, où ils laissent progressivement la place au sable (diamètre moyen de 0,25 mm, décroissant du SW vers le NE), qui prédomine dans les parties centrale et orientale du cordon. Cette présence de galets a deux significations. D'une part, elle traduit l'intervention probable dans l'alimentation sédimentaire du lido de sources locales de matériel moyen à grossier (grès infralittoraux). D'autre part, elle laisse à penser que les flux entrants de sable sont faibles ou nuls. Ceci est d'ailleurs confirmé par l'absence d'accumulation de sable de part et d'autre de l'épi qui marque le début du terrain du Conservatoire, à l'extrémité SW du lido.

1.2. Les modalités d'action des agents morphodynamiques

1.2.1. Le régime des vents et des houles

Sur le plan morphodynamique, les plages de la région sont soumises à un régime de vents marqué par une alternance entre des vents de terre fréquents et violents (80 % des observations) et des vents marins plus rares, mais qui peuvent être tout aussi violents (fig. 2) : les premiers sont principalement la tramontane (de secteur ouest à nord-ouest) et, secondairement, le mistral (de secteur nord-est), alors que les vents de mer proviennent essentiellement du sud-est. Les vents de terre induisent des houles locales (principalement du SW) fréquentes, mais peu agressives en raison de leur fetch limité, alors que les vents marins engendrent des houles (majoritairement de SE et SSE), moins fréquentes mais

nettement plus efficaces sur le plan morphogénique (fig. 2). Même si 80 % des houles ont une hauteur significative (*Hsig*) inférieure à 1 m, les tempêtes peuvent être extrêmement violentes (DURAND, 1999), avec des *Hsig* maximales supérieures à 6 m dans les cas extrêmes, comme en novembre 1982 ou en décembre 1997 à Sète, et des surcotes très importantes, atteignant 1,35 m N.G.F (alors que la marée astronomique maximum ne dépasse pas 0,35 m N.G.F.).

Ces houles subissent à l'approche du rivage un important phénomène de réfraction en raison de la présence, à la hauteur des Aresquiers (5 km au SW du domaine d'étude) de hauts fonds rocheux qui dévient vers l'Est les houles dominantes du SE et SSE (fig. 2). En conséquence, la dérive littorale dans le secteur est nettement résultante vers le NE, alors qu'elle est dirigée vers le SW à l'ouest des Aresquiers. Résultat, le lido ne bénéficie pratiquement d'aucune alimentation sédimentaire en provenance des secteurs adjacents.

1.2.2. L'impact des tempêtes sur l'évolution du lido

Les tempêtes peuvent avoir un impact morphogénique très important sur le lido. Ainsi, la tempête cinquantennale de novembre 1982, célèbre pour avoir engendrée un recul spectaculaire des plages de la Camargue (BLANC, 1985 ; BRUZZI, 1998), a provoqué un recul de 20 à 30 m du cordon en certains endroits (RUEDA, 1986). Lors de cet épisode exceptionnel, plusieurs brèches auraient également été ouvertes, en particulier une énorme brèche de plusieurs dizaines de mètres de large dans le secteur central du lido. Cette brèche aurait mis plusieurs mois à se refermer, mais elle a été ré-ouverte lors des fortes tempêtes des années suivantes (en 1987 et 1989). Le secteur restant très fragilisé, une digue de 450 m de long et positionnée à environ 70 à 80 m du trait de côte a été édifée entre septembre 1989 et avril 1990 pour protéger le lido. Par la suite, de nouvelles brèches ont été ouvertes dans d'autres endroits lors de l'hiver 1995-1996 (7 tempêtes), en décembre 1997, novembre 1999, et, plus récemment, lors du dernier hiver, dans le secteur le plus bas du lido, situé à moins de 1 mètre NGF (photo 2 sur la fig. 2).

Comme l'ont constaté plusieurs auteurs sur des littoraux similaires (MURTY & FLATHER, 1994 ; MORTON., 1994 ; BRUZZI, 1998), cette ouverture épisodique de brèches lors des tempêtes a un impact morphogénique essentiel. En effet, si le phénomène devient plus fréquent, en raison d'une

accélération de l'élévation du niveau marin et d'un renforcement des tempêtes, le risque de morcellement du lido est réel. En outre, les pertes de matériel sédimentaire pour la plage augmenteront, dans la mesure où, lors d'une tempête, une grande partie des matériaux déplacés par les vagues dans les étangs par submersion ou par ouverture d'une brèche, ne peut être récupérée par la suite. Tout ceci constitue un facteur d'accélération du recul de la plage.

1.2.3. Les variations récentes du niveau marin relatif dans la région

L'élévation récente du niveau de la mer dans la région est connue à partir des données obtenues par le marégraphe de Sète, situé à 10 km au SW du secteur étudié. Elle aurait été en moyenne de 0,3 mm par an sur la période 1888-1961¹ (PIRAZZOLI, 1986), ce qui est nettement inférieur à la moyenne mondiale pour le 20^e siècle (1,3 à 1,5 mm par an). Mais ces données présentent peut-être quelques incertitudes car elles sont issues d'un marégraphe non référé au niveau hydrographique français, et elles couvrent une période qui n'intègre pas les dernières décennies, au cours desquelles le réchauffement climatique a été le plus marqué (IPCC, 2001). Les marégraphes référés au niveau hydrographique français les plus proches sont, d'une part celui du port de Marseille qui révèle une élévation du niveau marin de 1,3 mm par an sur la période 1885-1978 (PIRAZZOLI, 1986 ; BLANC & FAURE, 1990), d'autre part celui du Grau de la Dent, situé dans le delta du Rhône, et qui montre une élévation de 2,1 mm par an sur la période 1905-1997, en raison de la subsidence qui affecte ce secteur (SUANEZ et al, 1997).

¹ Les données du nouveau marégraphe de Sète, opérationnel depuis 1987, ne couvrent pas encore une période assez longue pour pouvoir être exploitées, puisqu'il faut au moins 30 ans d'enregistrements en continu des niveaux marégraphiques pour pouvoir dégager une tendance évolutive significative du niveau marin (PIRAZZOLI, 1986).

2. Evolution du littoral au cours de la deuxième moitié du 20^{ème} siècle

2.1. Méthodologie

D'après les données issues de la comparaison de cartes anciennes (CLIQUE et al., 1984 ; RUEDA, 1986), le lido des étangs de Pierre Blanche et de Vic est en recul avéré depuis le 19^e siècle, le cordon littoral reculant en roulant sur lui-même à une vitesse moyenne de 0,5 m par an. Ces données sont toutefois insuffisantes pour servir de base à une démarche d'analyse prévisionnelle, qui ne peut se fonder que sur des valeurs précises d'évolution passées relevées à la hauteur de profils rapprochés sur le cordon littoral.

Dans cette optique, l'évolution du rivage a été analysée à échelle mi-séculaire, grâce à la comparaison de six missions aériennes IGN (1937, 1954, 1971, 1986, 1995 et 2001), complétées, pour 2002, par des levés de la position du trait de côte réalisés au moyen d'un GPS différentiel (D-GPS). Les photographies de chaque mission ont été corrigées et géoréférencées sur une carte topographique IGN au 1/25000^e, selon une méthodologie classiquement employée en photo-interprétation littorale (DOLAN et al, 1991 ; CROWELL et al, 1991, 1993 ; THIELER & DANFORTH, 1994 ; JIMENEZ et al, 1997 ; DURAND, 1999, 2000, 2001 ; MOORE, 2000 ; SABATIER & SUANEZ, 2003). Cette méthode repose sur l'application de modèles de correction polynomiaux calculés à partir d'amers (points invariables tels que des croisements de routes, bâtiments, jetées, digues) communs aux différents clichés et au document de référence.

Les photographies ont été corrigées et géoréférencées grâce au logiciel de traitement d'image *Ermapper*. Une fois ce travail achevé, les mesures d'évolution ont été effectuées sous le SIG *Mapinfo* à partir de 136 profils levés au D-GPS sur le cordon en juillet-août 2002 et espacés de 50 m le long des 7300 m du linéaire côtier. Les profils ont été superposés l'un après l'autre aux différentes photographies, ce qui a permis de comparer la position du trait de côte levée sur le terrain en 2002 avec la position du rivage sur chaque cliché. Toutes les mesures ont été converties en variations métriques par rapport à 1937, considérée comme l'année de référence (année zéro). Pour chaque mesure, la limite choisie pour représenter le trait de côte a été la ligne de rivage instantanée, c'est-à-dire l'interface plan d'eau/terre visible sur chaque photographie. Il s'agit de la limite généralement

retenue pour les études portant sur des côtes en régime microtidal à très faible marnage (GRENIER & DUBOIS, 1990 ; ROBIN, 2002), comme c'est le cas ici (marnage maximum de 35 cm).

La marge d'erreur de la méthode est ici estimée à +/- 8,5 m au maximum lors de la comparaison de la position du trait de côte entre deux clichés (tab. 1). Elle résulte de la conjonction des quatre types d'erreurs inhérentes à toute méthode de ce type (DOLAN et al, 1991 ; CROWELL et al, 1991, 1993 ; THIELER & DANFORTH, 1994 ; DURAND, 1999, 2000 et 2001)².

2.2. Résultats : évolution du trait de côte entre 1937 et 2002

Sur la période 1937 à 2002, le recul du lido est généralisé (fig.4). Toutefois, son ampleur est inégale, à la fois dans le temps et dans l'espace.

D'une part, l'érosion a été beaucoup plus faible entre 1937 et 1954 que lors des périodes suivantes (excepté pour 2001 à 2002), en particulier entre 1995 et 2001, où sont survenues de nombreuses tempêtes (DURAND, 1999) : onze tempêtes pendant l'hiver 1995-1996, tempête vingtennale en décembre 1997, décennale en novembre 1999.

D'autre part, l'évolution est inégale dans l'espace. Ainsi, dans les deux tiers orientaux du cordon (P10 à P82), le recul est pratiquement toujours supérieur à 60 m (0,9 m par an) ; dans la partie centrale de ce secteur (P30 à P60), il dépasse même largement 70 m (excepté au niveau des profils P48 à P50), avec jusqu'à 93 m de recul pour les profils P35 à P38, qui correspondent au secteur le plus bas du cordon, où des brèches sont régulièrement ouvertes lors des fortes tempêtes (photo 2 sur fig.2). En revanche, la partie occidentale du lido (P92 à P136) et son extrémité orientale (P1 à P5) apparaissent nettement moins fragiles : les reculs ont été beaucoup plus faibles, toujours inférieurs à 30 m, voire à 20 m pour plus de la moitié des profils. Sur environ 550 m de rivage (P125 à P 115), l'évolution a même été nulle. Or, cela correspond très exactement au seul secteur où la partie haute du cordon a été

² L'erreur potentiellement la plus importante, liée à la limite choisie pour représenter le trait de côte (DURAND, 2000), est ici minimisée en raison du faible marnage et par le fait que les différents clichés ont été réalisés dans des conditions identiques, en période estivale par temps anticyclonique. En outre, les plages de la région comportent en été, en bas de plage, un bourrelet marqué par une pente assez prononcée en direction de la mer (en moyenne 4%), ce qui minimise les impacts des écarts verticaux de hauteur du plan d'eau observés entre les différents clichés (au maximum 10 cm).

remodelée et protégée par des ganivelles ; dans ces conditions, on peut émettre l'hypothèse que ces infrastructures de protection légère ont renforcé la résistance du cordon, en permettant la formation d'une avant-dune embryonnaire (nebkas buissonnantes), qui joue un rôle protecteur lors des tempêtes.

3. Méthodologie de l'analyse prévisionnelle

3.1. Les problèmes inhérents à l'analyse prévisionnelle

Plusieurs auteurs ont proposé des synthèses de l'état de la recherche en matière d'analyse prévisionnelle (BLANC & FROGET, 1981 ; PILKEY et al, 1994 ; CROWELL et al, 1997 ; DOUGLAS et al, 1998 ; DURAND, 1999, 2001 ; DOUGLAS & CROWELL, 2000 ; THIELER et al, 2000 ; SABATIER, 2001 ; DUBOIS, 2002). Ils ont en particulier souligné l'existence de quatre grandes limites inhérentes à toute méthode d'analyse prévisionnelle, qu'il s'agisse de méthodes d'approche historiques – prévision de l'évolution d'un rivage par extrapolation dans le futur des données de son évolution passée – ou de méthodes modélisatrices – modélisation des processus qui entrent en jeu dans l'évolution d'un littoral afin de prévoir son évolution future à partir de l'application d'un certain nombre d'équations et de formules plus ou moins complexes.

La première limite tient au manque de données généralement disponibles. Ainsi, en prenant l'exemple de la méthode d'extrapolation historique la plus fréquemment employée, la régression linéaire, on considère que, pour obtenir des prévisions d'une fiabilité acceptable, il faudrait théoriquement disposer d'un échantillon minimal de trente données d'évolution passée couvrant un laps de temps au moins deux fois supérieur à la durée de la prévision. En pratique, ces conditions ne sont jamais réunies.

La deuxième limite réside dans l'extrême complexité de modéliser la dynamique littorale. C'est la difficulté fondamentale à laquelle se heurtent les modèles mathématiques de prédiction. En effet, la dynamique littorale résulte de l'interaction de processus naturels extrêmement divers et complexes qui sont difficilement appréhendables par de simples formules et équations, aussi élaborées soient-elles. En conséquence, ces dernières sont fondées sur des hypothèses qui aboutissent souvent à une schématisation grossière des processus naturels. Pour cette raison, les modèles prévisionnels sont

encore considérés aujourd'hui par de nombreux chercheurs comme peu fiables (PILKEY et al, 1993, 1994, 1996 ; YOUNG et al, 1995 ; THIELER et al, 2000 ; DUBOIS, 2002).

La troisième limite tient à l'absence de prise en compte des variations à court terme de la position du trait de côte. En effet, quel que soit le type d'approche employé, seule la tendance évolutive à long terme d'un rivage peut être prévue. Or l'évolution du littoral est caractérisée, par-delà une tendance à long terme, par des changements brutaux, sous l'impact de défluvations importantes et surtout de tempêtes, dont l'amplitude peut parfois dépasser l'amplitude des changements prévus à échéance de 100 ans (DOLAN et al, 1991).

Enfin, la prise en compte dans les prévisions du paramètre « élévation du niveau marin », comme c'est le cas ici, s'avère délicate. En effet, dans l'état actuel des connaissances, on reste la plupart du temps incapable de calculer avec précision le taux d'érosion qui serait induit par une élévation donnée du niveau marin (DUBOIS, 2002) : la seule méthode qui permet de le faire, le principe de BRUUN (BRUUN, 1962 et 1988), n'est applicable qu'à un nombre très restreint de plages (littoraux sans transit sédimentaire longitudinal). D'autre part, on ignore l'impact du phénomène d'élévation sur les transferts sédimentaires, même si certains modèles suggèrent une augmentation du transit longitudinal. Enfin, on ne sait pas dans quelle mesure une élévation renforcerait l'impact des tempêtes (accroissement de la fréquence des phénomènes de submersion, ruptures des cordons littoraux plus fréquentes, etc.). Dans ces conditions, il est difficile de mettre en évidence l'impact de l'élévation du niveau marin sur l'évolution future d'un rivage, mis à part dans les secteurs où la dynamique sédimentaire est nulle ou faible. A cet égard, les faces internes des cordons littoraux barrant des zones lagunaires, comme c'est le cas sur le site de Vic et de Pierre-Blanche, sont des espaces où il est sans doute moins aléatoire de prévoir les effets d'un tel phénomène, pour peu que l'on dispose de données topographiques précises permettant d'examiner la conséquence d'une simple élévation des plans d'eau lagunaires (submersion passive, excluant toute considération dynamique).

La démarche d'analyse prévisionnelle retenue pour le site d'étude n'échappe pas à ces limites et est donc à considérer avec la plus grande prudence. Elle se déroule en trois temps : prévision des évolutions par une approche historique, la régression linéaire ; prévision des évolutions par submersion passive, en appliquant un modèle de submersion à partir des levés topographiques levés au

D-GPS durant l'été 2002, selon le scénario d'élévation du niveau de la mer proposé par le Conservatoire d'ici 2050, soit + 22 cm ; combinaison des deux approches précédemment utilisées.

3.2. Démarche proposée pour le site des étangs de Vic et de Pierre-Blanche

3.2.1. Prévision de l'évolution du trait de côte par régression linéaire

Parmi les différentes méthodes d'approche historiques existantes, la méthode de la régression linéaire a été retenue car elle est considérée comme la moins aléatoire (CROWELL et al, 1997 ; FENSTER et al, 2001). Pour chacun des 136 profils disponibles, une régression a été calculée à partir de cinq dates d'évolution historique (1937, 1954, 1971, 1995 et 2002)³, couvrant une période de 66 ans. A chaque fois, la qualité de l'ajustement linéaire a été testée par le calcul du coefficient de détermination R^2 et une marge d'erreur estimée par le biais d'un intervalle de confiance à 80 %, défini à partir des écarts entre les valeurs réelles d'évolution passée et les valeurs calculées par le modèle linéaire pour l'ensemble des dates. Il faut toutefois garder à l'esprit qu'outre les limites propres à la régression linéaire (CROWELL et al, 1997 ; DOUGLAS et al, 1998 ; DURAND, 1999, 2001 ; SABATIER, 2001), l'échantillon de données utilisées est ici restreint et couvre une période inférieure à deux fois la durée de la prévision. Dans ces conditions, même si l'évolution historique du trait de côte entre 1937 et 2002 révèle une nette tendance à l'érosion, les prévisions peuvent potentiellement être affectées d'une marge d'erreur importante. Elles correspondent en quelque sorte à un scénario indicatif de l'évolution future de la ligne de rivage qui prend en compte le rythme d'élévation du niveau marin enregistré au cours du 20^e siècle, puisque celui-ci est intégré dans les évolutions historiques à partir desquelles ont été calculées les régressions, mais qui fait abstraction d'une accélération future de ce rythme d'élévation.

³ 2001 n'a pas été prise en compte dans le calcul de la régression car nous disposions avec 2002 déjà d'une date récente. Dans ces conditions, prendre en compte 2001 aurait donné artificiellement trop de poids aux dates les plus récentes dans le modèle linéaire.

3.2.2. *Prévision de l'évolution de la face interne du lido par submersion passive*

Ces prévisions reposent sur l'utilisation des données topographiques D-GPS acquises lors de la campagne de levés réalisée en juillet et août 2002 sur toute la largeur du cordon littoral, depuis l'avant-plage (-1 m de profondeur en mer) jusqu'aux berges de la lagune. Au total, la répartition est de un profil tous les 50 m sur les 7300 m de plage (soit 136 profils constitués chacun de 30 à 100 points de levés selon leur largeur), sauf aux extrémités du lido, où les profils sont espacés de 100 m. Les deux tiers des profils (P28 à 109) recourent entièrement le cordon, depuis sa face externe à sa face interne, les autres (P1 à 27 et P110 à 136) concernant seulement la partie externe du cordon. L'appareillage qui est mis en œuvre est un système D-GPS de très haute précision (infra-centimétrique), parfaitement adapté à la connaissance des formes et relief des plages. L'altimétrie des levés topographiques est exprimée dans le système d'altitude IGN 1969.

A partir des profils ainsi obtenus, la méthode utilisée pour évaluer l'évolution de la face interne du lido est la méthode de la « submersion passive » ; elle consiste simplement à simuler une translation de 22 cm du niveau de la mer et à cartographier les pertes en surface qui en résulteraient. La dynamique littorale étant peu active sur la face interne du lido, la démarche peut donner des résultats significatifs.

3.2.3. *Combinaison des prévisions par régression linéaire et submersion passive*

Il s'agit d'une tentative de combinaison, pour la face externe du cordon seulement, des valeurs obtenues par les deux approches, régression linéaire et submersion passive. Ainsi, pour un point X du cordon littoral, la prévision à l'échéance de l'année 2050 a été calculée par la formule suivante :

$$\mathbf{R} = \mathbf{r} + [(\mathbf{E21} - \mathbf{E20}) / \mathbf{P}]$$

Où

R = valeur de recul prévue en 2050 ;

r = valeur du recul prévu par la régression linéaire ;

E21 = valeur d'élévation du niveau marin prévue d'ici 2050 selon le scénario du Conservatoire, soit 22 cm ;

E20 = valeur moyenne annuelle d'élévation du niveau marin au 20^e siècle, soit 0,13 cm, multipliée par la durée de la prévision (48 ans) soit 6,24 cm (0,13 x 48) : cette valeur est à déduire car déjà prise en compte dans la prévision par la régression linéaire ;

P = pente du bas de plage et de la partie supérieure de l'avant-plage en %, depuis le haut de la berme jusqu'à la 1^{ère} barre pré-littorale, située à environ - 1 m.

Par exemple, si en un point X du cordon littoral où la pente du bas de plage est de 5 % – grâce à la précision des levés DGPS, la pente de la plage a pu être calculée précisément pour chacun des 136 profils –, le recul moyen du rivage prévu par régression linéaire est de 40 m, le recul total, en ajoutant le paramètre submersion passive sera égal à :

$$\mathbf{R} = 40 + [(22 - 6,24) / 5] \text{ soit } 40 + 3,15 \text{ soit } \mathbf{43,15 \text{ m}}$$

Evidemment, une telle démarche reste très hypothétique puisqu'elle revient à ignorer totalement les effets dynamiques d'une accélération de la hausse du niveau marin (augmentation de la fréquence et de la force des tempêtes, modifications éventuelles des transits sédimentaires, du profil de la plage). En outre, elle souffre des imprécisions évoquées plus haut liées à la mise en œuvre de la méthode de la régression linéaire. Toutefois, elle a le mérite de permettre de prendre en compte dans la prévision à la fois l'évolution passée du rivage (grâce à la régression linéaire) et la hausse supplémentaire du plan d'eau induite par l'accélération du rythme d'élévation du niveau marin (grâce à la submersion passive).

4. L'évolution future du lido

4.1. Un recul quasi-généralisé

Les résultats sont présentés à la fois sous forme de graphiques (fig.5 et 6) et de deux cartes (fig. 7 et 8). La figure 5 fournit quelques exemples de calculs de régression : concrètement, les coefficients de détermination (R^2) s'échelonnent entre 0,2 (ajustement de mauvaise qualité) et 0,99 (très bonne qualité) ; 50 % des prévisions ont un R^2 supérieur à 0,9 et 75% un R^2 supérieur à 0,7. La figure 7 synthétise les prévisions par régression linéaire seule pour l'ensemble du lido : sur cette figure, il faut tenir compte, pour la position du trait de côte en 2050, d'une marge d'incertitude variant

entre +/- 6 m et +/- 17 m selon les profils (intervalle de confiance à 80 %) ; évidemment, il ne s'agit pas ici de l'erreur réelle, qui est absolument impossible à déterminer, mais d'une simple incertitude statistique. Les figures 7 et 8 sont des cartes prévisionnelles élaborées à l'aide du SIG *Mapinfo* à partir du fond photographique 2001 (photos les plus récentes) ; elles représentent à la fois la position du rivage prévue en 2050 par la combinaison régression linéaire / submersion passive sur la face externe du cordon (cf. supra) et les pertes en surface prévues par application du seul principe de la submersion passive (simulation d'une translation du niveau de la mer de 22 cm) sur la face interne du lido – comme seuls les profils 28 à 109 recourent entièrement le cordon, de sa face externe à sa face interne, les pertes par submersion passive sur la façade lagunaire ne sont indiquées que pour ce secteur.

Sur la face interne du lido, les pertes prévues par submersion passive seraient de l'ordre de 157000 m² (15 ha) en 2050 pour les seuls profils P28 à P109 ; évidemment, si la totalité de la façade lagunaire avait été prise en compte, elles seraient probablement nettement supérieures. Sur la face externe du cordon, les prévisions font apparaître des reculs plus importants. Ainsi, le cordon littoral reculerait en roulant sur lui-même sur plusieurs dizaines de mètres, voire plus de 70 m par endroits. La surface de lido concernée par le phénomène serait de l'ordre de 260000 m² (26 ha) en 2050. Mais en fait, il ne s'agirait pas de réelles pertes en surface, car le lido se déplacerait parallèlement à lui-même : seule une étroite bande de rivage de quelques mètres de large à 15 m au maximum, là où la pente actuelle de la plage est très faible, serait réellement perdue – valeurs correspondant à la prise en compte du paramètre « submersion passive » en plus de la régression linéaire.

Si l'on examine maintenant en détail les prévisions, il apparaît que le recul prévu est très inégal selon les secteurs. On retrouve schématiquement la différenciation constatée lors de l'analyse de l'évolution du rivage depuis 1937, ce qui est normal puisque l'analyse prévisionnelle est fortement influencée par le traitement statistique des données d'évolution passée du rivage. Ainsi, les reculs les plus importants s'observeraient dans le secteur oriental et central du cordon (excepté l'extrémité orientale, entre P1 et P5), qui s'étend entre les P10 et P82, soit un linéaire côtier de 3800 m : le recul prévu d'ici 2050 y est toujours supérieur à 40 m et il dépasserait même 70 m entre les P31 et P37. Il est à noter qu'en deux endroits (P50 à P55 et P61 à P72), la partie haute du cordon est protégée par

une digue en dur, ces ouvrages étant situés actuellement à une distance de la ligne de rivage comprise entre 60 et 80 m, soit une distance à peine supérieure au recul prévu pour 2050. En conséquence, il est probable que ces ouvrages seront atteints par la mer à moyen terme, d'où blocage pour le cordon de la possibilité de reculer parallèlement à lui-même, risque d'accélération de l'érosion de la plage en avant et en aval-dérive des ouvrages, et à terme, déchaussement des digues. Des évolutions de ce type ont d'ailleurs été observées dans un contexte similaire sur le littoral voisin du delta du Rhône (BLANC & POYDENOT, 1993 ; SUANEZ & BRUZZI, 1999 ; PICON & PROVANSAL, 2002).

En revanche, dans la partie occidentale du lido (P92 à P136), le recul prévu n'est jamais supérieur à 20 m pour 2050. Dans le secteur protégé par des ganivelles (P125 à P116), les prévisions se traduisent même par une légère progression du rivage (< 10 m).

4.2. Discussion

Les incertitudes liées à l'analyse de l'évolution historique du trait de côte, ajoutées aux incertitudes inhérentes aux méthodes d'analyse prévisionnelle utilisées, peuvent engendrer des erreurs de prévision importantes. Toutefois, les méthodes employées reposent sur des hypothèses plausibles qui permettent raisonnablement de prévoir une diminution en surface et un recul du lido dans les décennies à venir.

D'une part, sur la face lagunaire du lido, il est probable qu'une hausse importante du niveau de la mer se traduise par des pertes en surface, à moins que l'on suppose que le cordon puisse connaître une alimentation sédimentaire suffisante pour s'exhausser sur sa face interne à une vitesse équivalente à celle du relèvement du niveau de la mer. Seulement, comme la dynamique est faible sur la face interne du lido, pour que le matériel arrive jusque là (par transport éolien, par submersion lors des tempêtes), il faudrait que le cordon connaisse dans son ensemble une alimentation sédimentaire incomparablement plus importante qu'elle ne l'est aujourd'hui. Or, on a vu que le secteur est peu, voire pas du tout, alimenté par du matériel en provenance des secteurs adjacents, notamment en raison d'une divergence de la dérive littorale immédiatement au sud-ouest, à la hauteur des hauts-fonds des Aresquiers, qui induisent un phénomène de réfraction des houles dominantes de SE et SSE (fig. 2). Il est peu probable qu'une hausse de 22 cm du niveau de la mer modifie fondamentalement ces conditions dynamiques.

D'autre part, le lido semble évoluer dans un schéma assez semblable à celui qui a été observé, à l'échelle de plusieurs décennies, pour des îles- barrières situées aux Etats-Unis, dans le golfe du Mexique (TAYLOR & STONE, 1996 ; PENLAND et al, 1998), et, à court terme, suite à de fortes tempêtes, pour des flèches sableuses sur les littoraux des deltas du Rhône (SUANEZ & PROVANSAL, 1996) et de l'Ebre (GUILLEN & PALANQUES, 1997). En effet, il apparaît que ces formes littorales réagissent face à une élévation du niveau marin en reculant parallèlement à elles mêmes – elles roulent sur elles-mêmes en quelque sorte – tout en conservant souvent leur morphologie générale et leur profil. Or, l'analyse de l'évolution historique du lido des étangs de Vic et de Pierre-Blanche révèle bien une évolution de ce type. En outre, dans le contexte d'accélération de l'élévation du niveau marin, et compte tenu du renforcement possible de la fréquence et de l'intensité des tempêtes, le lido risque d'être de plus en plus fréquemment morcelé par l'ouverture de brèches, qui auront de plus en plus de mal à être refermées. A terme, le lido risque donc de se transformer en îles-barrières, reliée aux étangs situés en arrière par des graus permanents. On se retrouverait alors dans un schéma très similaire à celui qui a été observé sur le long terme aux Etats-Unis. Dans ces conditions, la méthode de prévision historique par régression linéaire semble assez bien adaptée, car l'évolution s'inscrit alors dans un schéma assez simple.

Enfin, la faiblesse des dynamiques sédimentaires longitudinales dans le secteur rend la prise en compte dans les prévisions du paramètre « accélération de l'élévation du niveau marin » un peu moins incertaine. En effet, une des principales difficultés de l'intégration de ce paramètre dans un travail d'analyse prévisionnelle réside justement dans la prise en considération des modifications probables du transit sédimentaire. Ici, compte tenu de la faiblesse de ce transit, ce facteur aurait probablement peu d'influence. L'association des pertes par submersion passive aux prévisions par régression linéaire peut alors être considérée comme une manière « a minima » d'intégrer le paramètre d'accélération de la hausse du niveau marin. Evidemment, elle reste très critiquable puisqu'elle simplifie considérablement un phénomène très complexe, dont on ignore encore pratiquement tout des conséquences morphodynamiques. Toutefois, elle repose sur une hypothèse fondamentale, certes non vérifiable, mais qui correspond à un phénomène déjà observé par plusieurs chercheurs sur certaines

plages en réponse à une élévation du niveau marin : un recul du lido parallèlement à lui-même avec conservation de la pente et du profil de la plage.

Conclusion

Le système cordon littoral-lagune de Vic et de Pierre-Blanche apparaît particulièrement vulnérable en cas d'accélération de la hausse du niveau marin. En effet, ce phénomène se traduirait très probablement par des pertes en surface non négligeables sur la face interne du lido. La largeur du cordon s'en trouverait donc réduite, ce qui le fragiliserait face aux tempêtes. Parallèlement, on peut émettre l'hypothèse que le lido reculerait en roulant sur lui-même de plusieurs dizaines de mètres, voire plus de 70 m par endroits, poursuivant en cela une évolution entamée depuis plusieurs siècles, et observée sur des littoraux similaires (TAYLOR & STONE, 1996 ; PENLAND et al, 1998 ; SUANEZ & PROVANSAL, 1996 ; GUILLEN & PALANQUES, 1997). Ce recul serait plus rapide dans la partie centrale du lido, d'où une accentuation de sa concavité générale. Il pourrait en outre s'accompagner d'une perte en surface sur la face externe, par simple phénomène de submersion passive. Mais, en admettant qu'il y ait conservation globale du profil lors du recul, ces pertes resteraient relativement limitées (une quinzaine de mètres tout au plus), affectant par là même assez peu la largeur globale de la plage. En revanche, le recul s'accompagnerait probablement d'un morcellement du cordon en raison de l'ouverture de plus en plus fréquente de brèches lors des tempêtes, aboutissant à la mise en place de passes permanentes et à la transformation du lido en îles-barrières.

Dans ces conditions, il paraît totalement inutile et même dangereux de fixer le cordon par des ouvrages en dur, comme cela a été fait en certains endroits fragiles depuis la fin des années 1980. Ces ouvrages seront de toute manière rattrapés par le recul et ils risquent alors d'avoir des impacts très néfastes : disparition à terme de la plage située devant (par augmentation des phénomènes de réflexion), déstabilisation des secteurs situés en aval-dérive. Comme le recul du cordon parallèlement à lui-même paraît inéluctable, il nous semble vain de vouloir contrarier le phénomène. De plus, la principale infrastructure en arrière du cordon, le canal du Rhône à Sète, est située entre 370 m et 1000 m en arrière du trait de côte actuel : compte tenu des vitesses de recul prévisibles, cela laisse une marge d'environ 300 ans avant que l'ouvrage ne soit atteint. Tout juste peut-on essayer de ralentir un

peu le recul du lido en adoptant des mesures de protection légères (ganivelles) qui pourraient permettre la constitution d'une avant-dune protectrice vis-à-vis des tempêtes. Certes, l'efficacité de telles mesures serait peut être limitée en raison de la faiblesse de l'alimentation sédimentaire (notamment en matériel fin) du secteur, mais des ouvrages de ce type ne risqueraient pas d'avoir d'impacts néfastes sur l'évolution.

Références

BLANC, J.J. & FAURE, H. (1990) : La remontée récente du niveau de la mer. Exemples de Marseille, Gênes et Venise (Méditerranée). – *Géologie Méditerranéenne*, XVII, 2, 109-122.

BLANC, J.J. & FROGET, C.H. (1981) : Mesure et méthode d'étude quantitative de l'érosion des littoraux meubles, exemple de la Camargue. – *Bulletin de l'Association Française pour l'Etude du Quaternaire*, (18)-5, 47-52.

BLANC, J.J. & POYDENOT, F. (1993) : Le rivage de Faraman en Camargue (SE France) : un géosystème côtier en déséquilibre ; méthodes d'études, conséquences pratiques. – *Géologie Méditerranéenne*, XX, 2, 75-87.

BRUUN P. (1962): Sea-level rise as a cause of shore erosion. – *Proceedings of the American Society of Civil Engineers, Journal of Waterways and Harbors Division*, 88: 117-130.

- (1988): The Bruun Rule of erosion by sea level rise : a discussion on large-scale two-and three-dimensional usages. – *Journal of Coastal Research*, 4 (4): 627-648.

BRUZZI, C. (1998): Les tempêtes et l'évolution morphosédimentaire des plages orientales du delta du Rhône. – Thèse de Doctorat de Géographie, Université de Provence Aix-Marseille I, 325 p.

CLIQUE, P.M. ; FEUILLET, J. ; COEFFE, Y. (1984): Catalogue sédimentologique des côtes françaises. – Côte de la Méditerranée, de la frontière espagnole à la frontière italienne. Partie A : de la frontière espagnole à Sète. – Collection de la Direction des Etudes et Recherches d'EDF, Eyrolles, 9-105.

CHENAT, V. (2003) : Programme « Impact du changement climatique sur l'intervention du Conservatoire du Littoral : recul du trait de côte et orientations stratégiques ». Termes de référence des études de cas. – Conservatoire du Littoral & Fondation Procter et Gamble, Rapport inédit, 6p.

CROWELL, M., LEATHERMAN, S.P. & BUCKLEY, M.K. (1991): Historical shoreline change : error analysis and mapping accuracy. – *Journal of Coastal Research*, 7 (3): 839-852.

- (1993) : Erosion rate analysis : long term versus short term data. – *Shore and Beach*, 61 (2): 13-20.

- CROWELL, M. ; DOUGLAS, B.C. & LEATHERMAN, S.P. (1997): On forecasting future U.S. shoreline positions : a test of algorithms. – *Journal of Coastal Research*, 13 (4): 1245-1255.
- DOLAN, R., FENSTER, M.S. & HOLME, S.J. (1991): Temporal analysis of shoreline recession and accretion. – *Journal of Coastal Research*, 3 (1): 723-744.
- DOUGLAS, B.C ; CROWELL, M. & LEATHERMAN, S.P. (1998): Considerations for shoreline position and prediction. – *Journal of Coastal Research*, 14 (3): 1025-1033.
- DOUGLAS, B.C & CROWELL, M. (2000): Long-term shoreline position prediction and error propagation. – *Journal of Coastal Research*, 16 (1): 145-162.
- DUBOIS, R.N. (2002): How does a barrier shoreface respond to a sea-level rise ? – *Journal of Coastal Research*, 18 (2): Editorial, iii-v.
- DURAND, P. (1999): L'évolution des plages de l'ouest du golfe du Lion au 20^{ème} siècle. Cinématique du trait de côte, dynamique sédimentaire et analyse prévisionnelle. – Thèse de Doctorat, Université Lumière Lyon II, 2 vol., 461 p.
- (2000): Approche méthodologique pour l'analyse de l'évolution des littoraux sableux par photo-interprétation. Exemple des plages situées entre les embouchures de l'Aude et de l'Hérault (Languedoc, France). – *Photo-interprétation*, 1-2: 3- 52.
- (2001): Erosion et protection du littoral de Valras-Plage (Languedoc, France). Un exemple de déstabilisation anthropique d'un système sableux. – *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1: 55-68.
- FENSTER, M. ; DOLAN, R. & ELDER, J.R. (2001): A new method for predicting shoreline positions from historical data. – *Journal of Coastal Research*, 9 (1): 147-171.
- GRENIER, A. & DUBOIS, J.M.M. (1990): Evolution littorale récente par télédétection : synthèse méthodologique. – *Photo-Interprétation*, 6: 3-16.
- GUILLEN, J. ; PALANQUES, A. (1994) : Short-time evolution of a micro-tidal barrier-lagoon system affected by storm and overwashing : the Trabucador Bar (Ebro Delta, NW Mediterranean. – *Zeitschrift für Geomorphologie*, 38, 3, 267-281.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (2001): Climate change 2001 : Impacts, adaptation and vulnerability. – Contribution of the working group to the third assessment

report of the Intergovernmental Panel of Climate Change, World Meteorological Organization, Genève, 124 p.

JIMENEZ, J.A.; SANCHEZ-ARCILLA, A.; BOU, J. ; ORTIZ, M.A. (1997) : Analysing short-term shoreline changes along the Ebro delta using aerial photographs. – Journal of Coastal Research, 13 (4), 1256-1266.

LEVOY, F. & LARSONNEUR, C. (1993): Etude globale concernant la défense contre la mer, rapport d'interprétation des mesures de terrain. – Conseil Général de la Manche, Université de Caen, 163 p.

MOORE, L.J. (2000) : Shoreline mapping techniques. – Journal of Coastal Research, 16/1, 111-124.

MORTON (1994) : Meso-scale transfer of sand during and after storm: implication for prediction of shoreline movement. – Marine Geology, 126, 161-179.

MURTY & FLATHER (1994) : Impact of storm surges in the bay of Bengal.– Journal of Coastal Research, 12, 149-161.

PASKOFF, R. (1998): Conséquences possibles sur les milieux littoraux de l'élévation du niveau de la mer pour les prochaines décennies. – Annales de Géographie, 600: 233-248.

- (2001): L'élévation du niveau marin et les espaces côtiers. Editions Institut Océanographique, 212 p.

PENLAND, S.; BOYD, R. & SUTTER, J.R (1988): Transgressive depositional systems of the Mississippi delta plain : a model for barrier shoreline and shelf sand development – Journal of Sedimentary Petrology, 58 (6): 932-949.

PICON, B. & PROVANSAL, M. (2002) : Faut-il se protéger de la mer ? Instabilité naturelle et politiques publiques dans le delta du Rhône. – Faire Savoirs, 2, 75-80.

PILKEY, O.H. ; YOUNG, R.S. ; RIGGS, S.R. ; SMITH, A.W. ; WU, H. & PILKEY, W.D. (1993): The concept of shoreface profile of equilibrium : a critical review. – Journal of Coastal Research, 9: 255-278.

PILKEY, O.H. ; YOUNG, R.S. ; BUSH, D.M. & THIELER, E.R. (1994): Predicting the behavior of beaches : alternatives to models. – Littoral 94, Procs. Of the 2nd International Symposium, Lisbon, Association EUROCOAST, Portugal: pp. 53-60.

- PILKEY, O.H. ; YOUNG, R.S. ; THIELER, E.R. ; JACOBS, B.S. ; KATUNA, M.P. ; LENNON, G. & MOELLER, M.E. (1996): Reply to HOUSTON, J.R., 1996, discussion of YOUNG and al, 1995, a discussion of the Generalized Model for Simulating Shoreline Change (GENESIS). – *Journal of Coastal Research*, 12: 1044-1050.
- PIRAZZOLI, P.A. (1986): Secular trends of relative sea-level (RSL) changes indicated by tide-gauge records. – *Journal of Coastal Research*, 1: 1-26.
- ROBIN, M (2002): Télédétection et modélisation du trait de côte et de sa cinématique. – In : *Le littoral : regards, pratiques et savoirs. Etudes offertes à Fernand Verger.* – Ed. ENS., Paris: 95-117.
- RUEDA, F. (1986) : Le littoral du Gard et de l'Hérault. – Rapport non publié, Service maritime et de navigation du Languedoc-Roussillon, 62 p.
- SABATIER, F. (2001) : Fonctionnement et dynamiques morpho-sédimentaires du littoral du delta du Rhône. Thèse de doctorat de géosciences de l'environnement, option géographie. Université Aix-Marseille III, 244 p.
- SABATIER, F. & SUANEZ, S. (2003) : Evolution of the Rhône Delta coast since the end of the 19th century. – *Géomorphologie: relief, processus et environnement*, 4, 283-300.
- SALOMON, J.N. & PRAT, M.C. (1997) : L'évolution récente du littoral charentais. Lignes de rivage et systèmes dunaires. – *Quaternaire*, 8 (1), 21-37.
- SUANEZ, S. & PROVANSAL, M. (1996): Morphosedimentary behaviour of the deltaic fringe in comparison to the relative sea-level rise on the Rhône delta. – *Quaternary Science Reviews*, 15, 811-818.
- SUANEZ, S.; PROSPER, V.; PROVANSAL, M. (1997): Variation relative du niveau marin dans le delta du Rhône. Implication climatique et/ou tectonique. – *C.R. Acad. Sci. Paris, t234, série IIa*, 639-646.
- SUANEZ, S. & BRUZZI, C. (1999) : Shoreline managements and its implications for the coastal processes on the eastern part of the Rhône delta. – *Journal of Coastal Conservation*, 5, 1-12.
- TAYLOR, M. & STONE, G.W (1996): Beaches ridges : a review. – *Journal of Coastal Research*, 12 (3): 612-621.

THIELER, E.R. & DANFORTH, W.W. (1994): Historical shoreline mapping (I) : improving techniques and reducing positioning errors. – Journal of Coastal Research, 10 (3): 549-563.

THIELER, E.R. ; PILKEY, O.H. ; YOUNG, R.S. ; BUSH, D.M. & CHAI, F. (2000): The use of mathematical models to predict beach behavior for U.S. coastal engineering : a critical review. – Journal of Coastal Research, 16 (1): 48-70.

WRAY, R.D., LEATHERMAN, S.P. & NICHOLLS, R.J. (1995): Historic and future land loss for upland and marsh islands in the Chesapeake Bay, Maryland, U.S.A. – Journal of Coastal Research, 11 (4): 1195-1203.

Adresses des auteurs: Paul DURAND, Université Paris I Panthéon-Sorbonne, UMR 8591, 191 rue St-Jacques, 75005 Paris & Hugues HEURTEFEUX, E.I.D Méditerranée, 165 avenue P. Rimbaud, 34184 Montpellier Cédex 4.

Titre et légendes des tableaux et figures

Tableau 1 Récapitulatif des erreurs inhérentes à la correction des photographies

Table 1 Errors due to the aerial photographs correction process

Fig. 1 Localisation du secteur étudié

Fig. 1 Location of the study area

Fig. 2 Présentation morphologique du cordon littoral

A. galets prédominants ; B. mélange galets-sables ; C. sables prédominants ; photo 1. partie orientale du lido, entre les profils n°1 et 30 (source : [www. Francevuesurmer.com](http://www.francevuesurmer.com), Pascal Le Fichant, 2003) ; photo 2. secteur du lido où une brèche a été ouverte lors des tempêtes de l'hiver 2002-2003, entre les profils n°30 et 35 (source : EID Méditerranée, avril 2003)

Fig. 2 Morphology of the beach barrier

A.. mainly pebbles ; B. pebbles and sand mixed; C. mainly sands; photo 1. oriental part of the beach barrier, between the profiles 1 and 30 (source : [www. Francevuesurmer.com](http://www.francevuesurmer.com), Pascal Le Fichant, 2003) ; photo 2. beach barrier area where a breach was opened by storms during the winter 2002-2003, between the profiles 30 and 35 (source : EID Méditerranée, avril 2003)

Fig. 3 Profil transversal du cordon littoral

1. étangs ; 2. nebkas buissonnantes ; 3. haut de plage surcreusé ; 4. bourrelet de plage ; 5. fosse ; 6. barre interne ; 7. barre externe ; 8. grès ; a. *Juncus acutus* ; b. *Helichrysum stoechas* ; c. *Ammophila arenaria*.

Fig. 3 Cross section of the beach barrier

1. lagoons ; 2. nebkas ; 3. upper-beach ; 4. berma ; 5. runnel; 6. internal ridge ; 7. external ridge ; 8. Sandstones ; ; a. Juncus acutus ; b. Helichrysum stoechas ; c. Ammophila arenaria.

Fig. 4 Evolution du trait de côte de 1937 à 2002

Fig. 4 Shoreline evolution from 1937 to 2002

Fig. 5 Exemples de prévisions des évolutions par régression linéaire

Fig. 5 Examples of forecasts by linear regression

Fig. 6 Evolution du trait de côte de 1937 à 2002 et prévisions pour 2050

1. position réelle du trait de côte en 2002 ; 2. position du trait de côte en 2002 calculée par régression linéaire ; 3. position du trait de côte en 2050 prévue par régression linéaire

Fig. 6 Shoreline evolution from 1937 to 2002 and forecasts for 2050

1. Real shoreline position in 2002; 2. shoreline position in 2002 calculated by linear regression; 3. shoreline position in 2050 forecasted by linear regression

Fig. 7 Evolution future du système cordon littoral – lagune de Vic et de Pierre-Blanche d'ici l'année 2050 (entre les profils n°1 et n°70)

Fig. 7 Future evolution of the barrier-lagoon system of Vic and Pierre-Blanche by the year 2050 (between the profiles n°1 and n°70)

Fig. 8 Evolution future du système cordon littoral – lagune de Vic et de Pierre-Blanche d'ici l'année 2050 (entre les profils n°70 et n°136)

Fig. 8 Future evolution of the barrier-lagoon system of Vic and Pierre-Blanche by the year 2050 (between the profiles n°70 and n°136)

Type d'erreur	Estimation en m
Erreur dans le repérage des amers	+/- 1 pixel par photo soit +/- 2 m entre deux photos
Erreur résiduelle de calcul (R.M.S erreur)	+/- 1 pixel par photo soit +/- 2 m entre deux photos
Erreur de mesure sur les photos corrigées	+/- 1 pixel par photo soit +/- 2 m entre deux photos
Erreur liée à la limite choisie pour représenter le trait de côte	+/- 2.5 m entre deux photos
Marge d'erreur entre deux photos corrigées	+/- 8.5 m

Tableau 1