

Dynamique des marais d'arrière-barrière associée à la passe de Barra Nova (Ria Formosa, Portugal méridional)

Evolution of backbarrier salt marshes related to the Barra Nova inlet dynamics (Ria Formosa, south Portugal)

Frédéric Bertrand*, Stéphane Costa**, Gilles Arnaud-Fassetta***, Robert Davidson**, Gérard Beltrando***, Lydie Goeldner-Gianella*, Nacima Baron-Yellès****

Résumé

La cartographie diachronique des marais de Barra Nova situés dans la lagune mésotidale de la Ria Formosa (Portugal méridional) met en évidence les changements physiographiques occasionnés par l'ouverture artificielle d'une passe en juin 1997. L'active circulation sableuse en avant des marais est replacée dans le cadre du fonctionnement d'une passe dominée alternativement par l'action de la houle et de la marée, suivant la variabilité des conditions météo-marines. Un protocole bi-annuel de suivi sédimentaire consistant en quatre campagnes de mesures successives a montré un abaissement général des schorres, en dépit d'une accrétion momentanée de leur partie inférieure couverte de végétations pionnières à *Spartines* (*Spartina maritima*). Cette dynamique est à relier à l'asymétrie des courants de marée ainsi qu'à la stabilité de position de la passe. Cette dynamique est susceptible de s'inverser dans les années à venir sous l'effet de la migration de la passe et de l'instauration de conditions d'abri.

Mots clés : marais, dynamique végétale, accrétion, courants de marée, variabilité climatique.

Abstract

*Mapping of salt marsh habitats through time in the western part of the Ria Formosa mesotidal lagoon (south Portugal) highlights the morphological and botanical changes related to an inlet artificially cut through the barrier island system in 1997. Sand transport and deposition pattern within the backbarrier area appear to be linked to the reversal of tidal or wave-dominated conditions through the inlet in response to meteorological variability offshore. Results from two years of sediment monitoring have shown a surface lowering of all plots, particularly in the upper and mature marshes, although short periods of accretion were recorded in the lower *Spartina* marshes. This unusual pattern of sedimentation can be related both to the asymmetry typical of such shallow-water environments and to the long-term stability of the inlet location. It seems likely that the rate of salt marsh lowering will decline or even revert in the future as confinement of the marsh increases due to an eastward migration of the inlet.*

Key words: salt marsh, vegetation succession, accretion, tidal current, climatic variability.

Abridged English Version

The Barra Nova marshes are marsh-covered remnants of former flood deltas developed in the western part of the Ria Formosa lagoon (fig. 1), on Portugal's Algarve mesotidal coast (Andrade, 1990). Since an artificial inlet was opened in June 1997 to improve water circulation within the lagoon, these marshes may be considered as newly "open" marshes.

Among several studies conducted within the framework of the European MAST III project, the "INDIA" project focuses on the morphological evolution of the inlet in relation to energetic hydrodynamic conditions and predominant wave direction from the west (Balouin, 2001). The present study, which is part of the French CNRS-APN "Ria Formosa" project (Bertrand et al., 2001), focuses on the migration of sand shoals and channel migration in the backbarrier together

* Département de Géographie, université Panthéon-Sorbonne (Paris 1), 191 rue Saint-Jacques 75005 Paris, UMR 8586 CNRS-PRODIG. E-mail : frederic.bertrand@univ-paris1.fr

** Département de Géographie, université de Caen Basse-Normandie, Esplanade de la Paix, BP 5186, 14032 Caen Cedex, UMR 6554 CNRS-GEOPHEN. E-mail : stephane.costa4@libertysurf.fr

*** Département de Géographie, université Denis Diderot (Paris 7), 2 place Jussieu, 75251 Paris cedex 05, UMR 8586 CNRS-PRODIG. E-mail : fassetta@paris7.jussieu.fr

**** Département de Géographie, université de Marne-la-Vallée, Cité Descartes, 5 boulevard Descartes, Champs-sur-marne, 77454 Marne-la-Vallée cedex 2, UMR 8586 CNRS-PRODIG. E-mail : nbaron@univ-mlv.fr

with morphological and botanical changes in the backbarrier fringe marshes. A previous review of satellite image and meteorological data had already suggested that the periodically increased energy of waves coming from the East produced a landward migration of sediments within the inlet and significant changes in physiographic features of the adjacent salt marshes.

In order to specify and understand changes occurring in the present flood delta dynamics, a multitemporal analysis of metre-range aerial photographs recorded before and after June 1997 was initially carried out (fig. 2). This detection technique coupled with ground truth validation has shown to be reliable for mapping salt marsh communities following the hierarchical classification of European habitats developed by the CORINE Biotopes project as well as for monitoring dynamical processes. From the analysis of pluriannual variation of aerological conditions – at both the surface and at 850 hPa levels – and multirate 10-m range satellite image, morphological changes within the open backbarrier were considered to represent a response of the sandflat–salt marsh system to variations in the magnitude and frequency of wave events. Using buried plates as reference planes, an estimation of short-term vertical changes over a two-year period provided information on the manner in which the surface morphology of the Barra Nova salt marsh responds to landform changes.

The ongoing marshes dynamics are partly dependant on the existence of physiographical features inherited from earlier stage of marsh development on both sides of a relict ebb shield. A line transect (fig. 4) shows that on the landward side of the ebb shield, the marsh has been gradually developing to a typical "mature" salt marsh with an entirely but spatially complex vegetated surface, except for the meandering low-order channel creeks and the secondary, elongate salt pans. The sheltered position of that salt marsh contrasts with the marsh on the south of the shield, which exhibits a more structured configuration comprising parallel zones of vegetation and a strong elevational gradient.

After the inlet channel was cut, the entire front of this newly "open" marsh was directly flooded by rising tides, thus allowing a flood jet to spread over the marsh surface and shoaling of the previous channels with sand provided by easterly longshore drift into the lagoon (fig. 5). During a short period following June 1997, sediment accumulation on the flood ramp locally acted as a tidal wave buffer so that isolated clumps of *Spartina* started to colonize undulating sand flats above mean high water neap. However, changes in sand transport pathways in response to tidal inlet evolution and climatic variability disrupted the entire salt marsh growth pattern. Once the flood delta was formed and as westerly air fluxes decreased, backbarrier shoals started to migrate northward as a consequence of the deflection of the ebb flow along the Ancão peninsula, and because of the enhancement of flood flow in the direction of northerly incident waves. This hydrodynamical change produced a clockwise hydrological pattern within the backbarrier leading to stronger ebb currents along the saltmarsh edge of the flood delta. Three years after the inlet was cut, strengthened wes-

terly fluxes resulted in sand by-passing to the downdrift side of the ebb delta, which then started to move into the lagoon under the effect of easterly aerological events. As flow was already channelised, it could not generate a flood delta. Transported sand partially filled the eastern ebb channel, which subsequently started to act as a buffer to the tidal wave and resulted in sheltering the marsh system. Meanwhile, the western channel was rejuvenated, involving the capture of a larger portion of the tidal prism.

As a consequence of shoal formation and instability, the lower part of the middle marsh, which was sheltered by a fronting sandflat, experienced alternate periods of accretion and erosion. During the entire period of monitoring, vertical erosion was less significant (-0.6 cm/yr) on plots located on or near the salt edge than on the upper parts of the middle marsh (-1.6 cm/yr), where many erosion features were noticed. This may represent a hydraulic adjustment of the salt marsh system to the dissipation of flood velocities over the sandflats, enhancing the typical tidal curve asymmetry of such shallow water environments. The increasing complexity of floristic assemblages, the spatial structure of communities and temporal patterns of succession observed on tidal flood marshes may be seen as a botanical response to acting physical processes in such a manner as to resist the turbulence caused by shifting sediment budgets and short-term geomorphic changes.

Introduction

Les marais de Barra Nova font partie des marais d'arrière-barrière de la vaste lagune mésotidale (111 km²) de la Ria Formosa (Pilkey *et al.*, 1986 ; Dias, 1988 ; Andrade, 1990 ; Bettancourt, 1994), située sur la bordure septentrionale du Golfe de Cadix (fig. 1). Ces marais font face, depuis juin 1997, à une passe ouverte artificiellement afin de favoriser les échanges hydrologiques entre la partie occidentale du bassin lagunaire, protégée par l'étroite flèche transgressive d'Ancão, et l'Océan atlantique. Les enjeux environnementaux de cet aménagement hydraulique (valorisation des ressources halieutiques de l'écosystème lagunaire, défense des infrastructures urbaines et touristiques de la flèche) ont donné lieu au programme européen de recherche MAST III – INDIA (Inlet Dynamic Initiative – Algarve) visant à la caractérisation et au suivi de la passe entre 1998 et 2000 (Williams *et al.*, 2003). La prédominance marquée du jusant a conduit à ranger la passe dans la classe des embouchures à énergie mixte dominée par la marée (Balouin, 2001) tandis qu'un modèle d'évolution a été proposé, sur la base des échanges sédimentaires entre les bordures extérieures de la passe d'une part et leurs variations d'autre part en fonction de l'intensité des flux d'ouest dominants (Balouin, 2002).

Parallèlement, le programme de recherche "Aide à Projet Nouveau (APN)-Ria Formosa" du CNRS consacré à la dynamique évolutive des marais a été conduit dans la lagune, entre 2000 et 2002, afin de mieux connaître les conditions de leur préservation, dans un contexte de forte perturbation anthropique des processus naturels (Bertrand *et al.*, 2000 ; Baron *et al.*, 2003). Les premiers résultats ont

conduit à nuancer l'idée d'un simple contrôle des flux d'ouest sur l'évolution à court terme de ces passes et à envisager une dualité de fonctionnement selon l'alternance saisonnière des conditions météo-marines et du renforcement hivernal des flux d'est (Bertrand *et al.*, 2001). Bien que l'équilibre dynamique des deltas de jusant et de flot ait pu être considéré comme atteint dès l'été 1998 (Vila *et al.*, 1999), l'intense circulation sableuse devant les marais d'arrière-barrière et les changements des formes riveraines ont conduit à émettre l'hypothèse d'une poursuite des échanges hydrosédimentaires entre la lagune et l'Océan et d'une influence de ces échanges sur la dynamique des marais.

Afin d'étayer cette hypothèse, une analyse comparative par photo-interprétation des états de surface des marais avant et après l'ouverture de la passe a d'abord été menée. Les changements mis en évidence ont été replacés, ensuite, dans le cadre plus général de l'évolution de la passe et de la variabilité des conditions météo-marines. Un protocole expérimental de suivi sédimentaire a permis enfin de préciser la réponse des marais à l'instabilité morphodynamique de l'embouchure et de la replacer dans un schéma de fonctionnement général de la passe.

Méthodologie

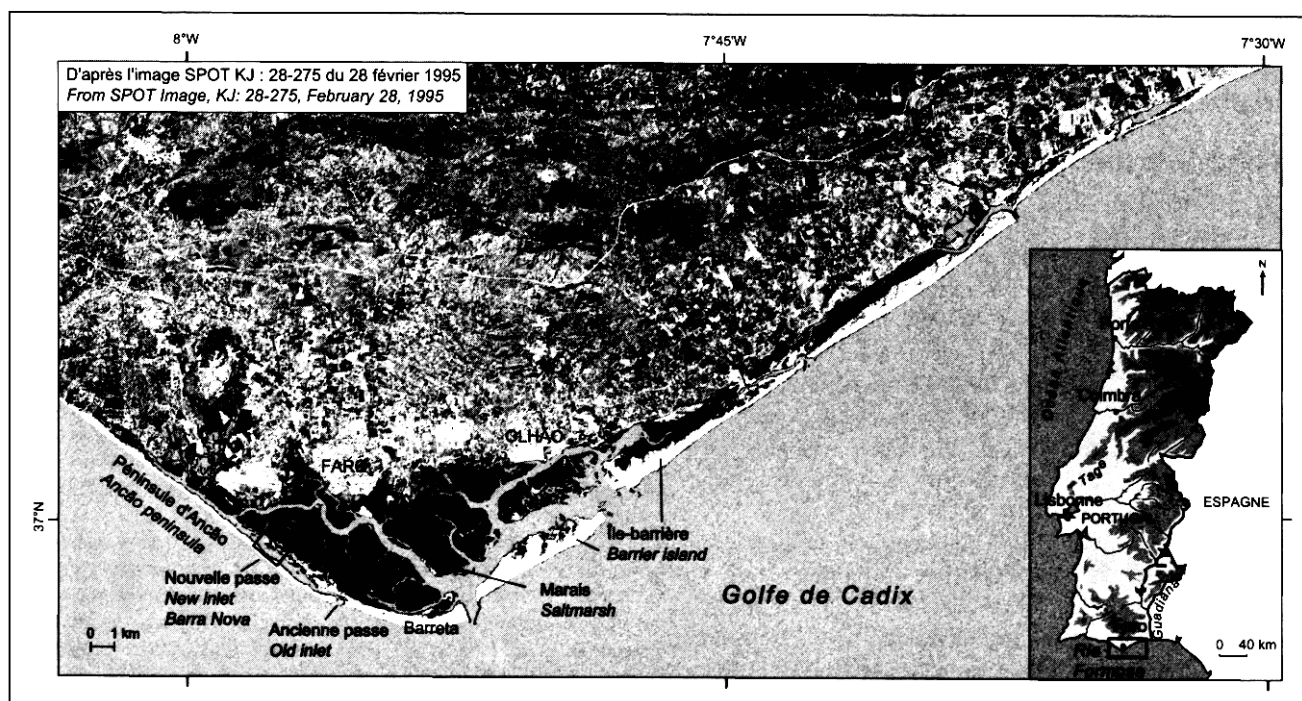
Une étude de la répartition initiale des formations végétales a été conduite à partir de l'interprétation d'un cliché aérien en couleurs naturelles, réalisé le 30 août 1996 (Mission INAG-VERFOTO V-44, n° 554160). Acquis en situation de basse mer de vive eau et à grande échelle (1:8 000), ce document est le plus apte à fournir des renseignements précis sur l'ensemble de l'estran, notamment sur les variations de faciès sédimentaire et sur la couverture végétale du bas estran. L'identification des groupements végétaux a été conduite sur la base de la liste typologique du programme

"CORINE Biotopes" dédié à la description des sites d'importance pour la conservation de la nature en Europe. Elle utilise comme référence principale les unités de base de la classification phytosociologique de la végétation (Géhu, 1979). Les unités hydrosédimentaires cartographiées ont été choisies suivant leur interaction avec la dynamique végétale. Leur nomenclature est conforme à celle de la géomorphologie dynamique proposée par A.J. Mehta (1996). La distribution altitudinale des groupements végétaux et des ensembles hydrosédimentaires les plus significatifs a été établie le long de deux transects à l'aide d'un système de positionnement global différentiel (DGPS).

En l'absence de données bathymétriques et courantologiques précises, le fonctionnement hydrosédimentaire des marais a été appréhendé à l'aide d'un protocole combinant l'analyse d'images multispectrales à haute résolution SPOT et l'étude des conditions météo-marines au droit de la passe. Les résultats ont été confrontés aux conclusions des recherches conduites dans le cadre du programme MAST III-INDIA qui a permis de modéliser le fonctionnement de la passe de Barra Nova en rapport avec la dynamique externe des îles-barrières (Balouin, 2001). L'analyse de l'évolution physiographique de la lagune est fondée sur la visualisation des images des 21/09/1997, 18/12/1999 et 18/07/2000 acquises respectivement en situation de basse mer de vive eau, de pleine mer de morte eau et de mi-marée. Les données numériques ont été transformées en compositions colorées, rehaussées par le 2^e axe d'une analyse en composantes principales et interprétées visuellement. Cette transformation avait pour objectif de construire un indicateur synthétique de la répartition des fonds autour de la

Fig. 1 – Localisation du secteur d'étude.

Fig. 1 – Location of the study area.



se passe en éliminant l'information redondante des données brutes.

Le rythme d'exhaussement ou d'abaissement du marais de Barra Nova a été mesuré à partir d'un dispositif de plaques enfouies sous la surface du marais, suivant une procédure déjà expérimentée dans les marais de la Humber au Royaume-Uni (Brown, 1998) et en Baie du Mont-Saint-Michel (Bonnot-Courtois et Levasseur, 2000). Six plaques ont été posées de part et d'autre de l'écu de jusant remanié afin de tenir compte d'éventuels effets d'exposition sur la sédimentation des marais. Quatre plaques de mesure ont été installées de façon symétrique sur le front de schorre (BN 13, BN 21) et au niveau de la zone de transition entre le bas schorre et le moyen schorre des deux marais (BN 12, BN 22) où l'extension progressive du marais était apparue la plus sensible sur les photographies aériennes. Au sein du marais d'arrière-écu, une station supplémentaire (BN 23) a été établie au contact du bas et du moyen schorre tandis qu'une dernière plaque (BN 13) complète le dispositif de front d'écu au niveau du moyen schorre pour déterminer si celui-ci relève de la même dynamique que le bas estran frontal.

Les changements détectés ont été replacés dans le cadre des conditions météo-marines au droit de la lagune de la Ria Formosa telle qu'elles ont pu être établies à partir de l'analyse des champs de pression en surface et à 850 ha pour la période 1986-2000 (Bertrand *et al.*, 2001). En s'attachant en particulier à l'analyse du rapport entre la fréquence et l'intensité des flux d'ouest et d'est, ce premier travail avait mis en évidence une variabilité pluri-annuelle des conditions d'agitation marine susceptible de favoriser, sur des périodes significatives pour l'évolution morphologique de la lagune, des mobilisations et des transits sédimentaires de directions opposées. Les données image des variations constatées acquises à différentes périodes vont permettre de préciser les modalités du comblement de la lagune

Caractérisation des marais avant et après l'ouverture de la passe

Un ancien marais de delta de flot inégalement évolué

La carte de répartition des formations végétales (fig. 2) montre que les marais de Barra Nova se sont développés, comme ailleurs dans la lagune (Bettancourt, 1990 ; Andrade, 1991), sur un bouclier – ou écu – de jusant, construit à l'extrémité distale d'un ancien delta de flot dont seule la partie sommitale, surélevée sous forme dunaire, a échappé au comblement. La répartition des formations végétales y traduit une évolution différente de part et d'autre de ce relief faisant office de ligne de partage des eaux.

Au nord, en position d'abri, un vaste marais s'est développé en liaison avec des conditions de faible énergie. Ce secteur relève dans son ensemble du moyen schorre. La grande étendue de fourrés bas d'Obione (*Atriplex portulacoides*) lui confère une forte homogénéité d'ensemble même si l'identification de faciès particuliers permet de détecter

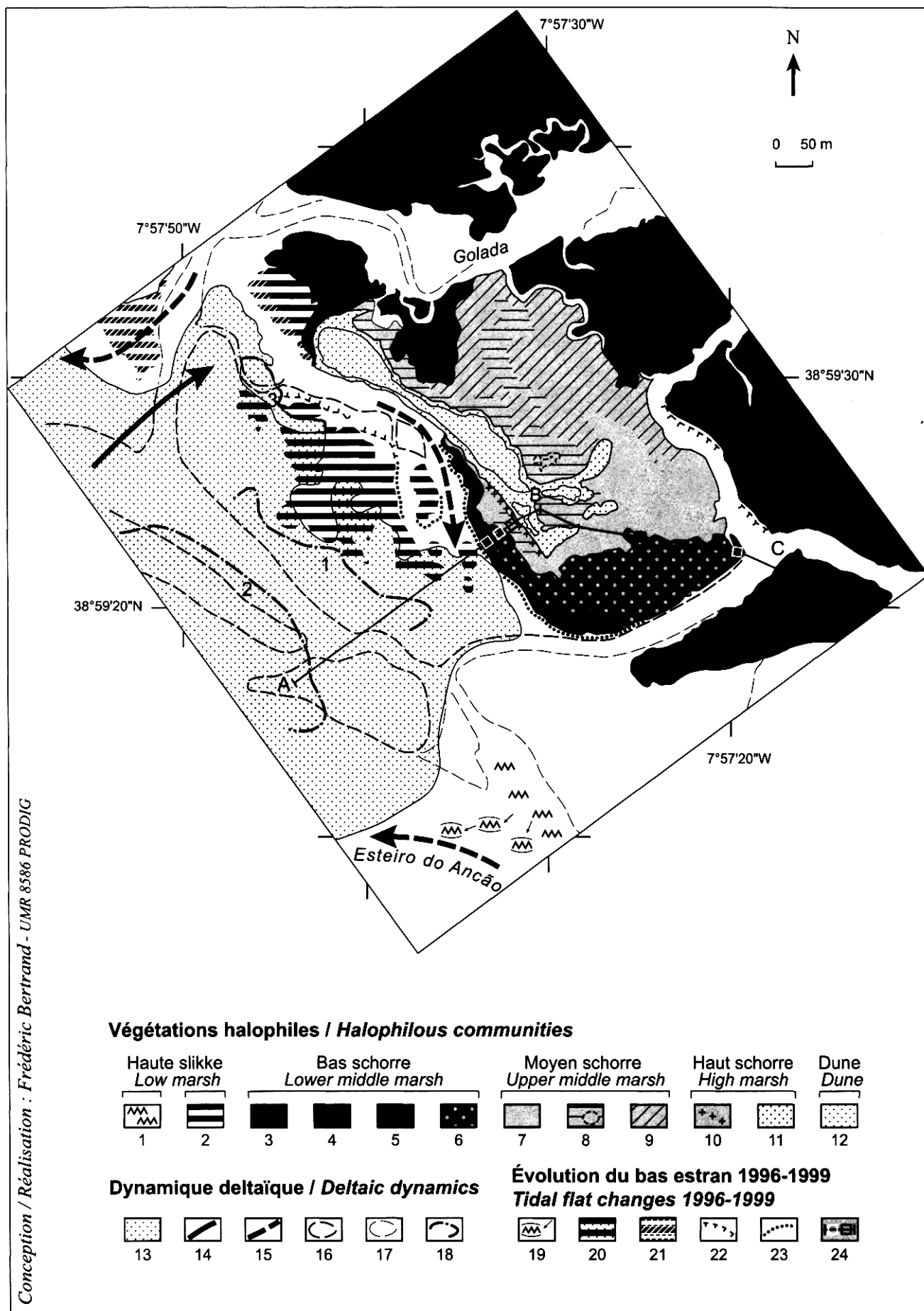
une certaine hétérogénéité intra-zonale. Ce moyen schorre passe latéralement autour des extrémités de l'écu à un bas schorre à Salicorne vivace (*Arthrocnemum perenne*) criblé de dépressions fermées. Par leur forme en ruban, ces dépressions soulignent "en pointillé" le tracé de chenaux anciennement sectionnés. Les associations à Salicorne vivace (*Arthrocnemum perenne*), Obione (*Atriplex portulacoides*) et Salicorne ligneuse (*Arthrocnemum fruticosum*) y sont fortement imbriquées (fig. 3C et 3D).

Au sud de l'écu, la structure du marais est plus strictement zonée. La partie supérieure du transect (fig. 4) permet d'observer, suivant une pente conforme relativement accusée, une séquence complète conduisant graduellement du haut schorre arbustif dominé par la Salicorne à gros épis (*Arthrocnemum glaucum*), la Soude ligneuse (*Suaeda vera*) et le Limoniastrum monopétale (*Limoniastrum monopetalum*) à un bas schorre à Spartines (*Spartina maritima*) en très nette progression depuis 1958. Le passage graduel (fig. 3B) entre les formations végétales du moyen et du bas schorre ainsi que les touffes isolées de Spartines (*Spartina maritima*) traduisent la translation vers l'aval des ceintures végétales accompagnant une évolution morphologique par extension progressive simple (Verger, 1988).

Toutefois, à l'échelle de l'ensemble de l'estran de front d'écu, la transition entre le schorre et la slikke n'est pas continue. Le raccordement habituel en glacis entre ces deux niveaux bionomiques est interrompu par des ressauts topo-

Fig. 2 – Distribution de la végétation et dynamique des marais de Barra Nova (d'après les photographies aériennes INAG-VERFOTO V44, n° 554160, 1996, et UAGA-F, n° 13160, 1999). 1 : herbier à *Zostera noltii* ; 2 : *Spartina maritima* éparées ; 3 : prairie dense à *Spartina maritima* ; 4 : mosaïque *Spartina maritima* et *Arthrocnemum perenne* ; 5 : tapis prostré d'*Arthrocnemum perenne* ; 6 : mosaïque *Arthrocnemum sp.* et *Atriplex portulacoides* ; 7 : fourré mixte *Atriplex* et *Arthrocnemum fruticosum* ; 8 : faciès à *Arthrocnemum sp.* dominantes et cuvette d'annuelles ; 9 : faciès à *Atriplex portulacoides* dominant ; 10 : groupement d'annuelles sur matelas organique ; 11 : fourré haut à nanophanérophites ; 12 : pelouse plus ou moins ouverte sur dune semi-fixée ; 13 : delta de flot ; 14 : chenal de flot ; 15 : chenal de jusant ; 16 : banc sableux fossilisé ; 17 : banc sableux résiduel ; 18 : écu de jusant (par ordre de formation) ; 19 : herbier en progression ; 20 : touffes de *Spartina maritima* coalescentes sur accumulations récentes ; 21 : haute-slikke érodée ; 22 : micro-falaise d'érosion ; 23 : front de *Spartina maritima* pionnières ; 24 : transect (fig. 4).

Fig. 2 – Pattern and dynamics of vegetation in the Barra Nova marshes (from aerial photographs INAG-VERFOTO V44, 1996, n° 554160 and UAGA-F, 1999, n° 13160). 1: seagrass meadows (*Zostera noltii*); 2: open tidal flat with scattered *Spartina* clumps; 3: continuous *Spartina* swards; 4: *Spartina* and *Arthrocnemum perenne* mosaic; 5: perennial prostrate *Arthrocnemum*; 6: perennial *Arthrocnemum* and *Halimolobos* mosaic; 7: *Arthrocnemum scrub* and *Halimolobos* mosaic; 8: *Arthrocnemum scrub* with annuals colonising salt pans; 9: pure stands of *Atriplex portulacoides*; 10: open halo-nitrophilous communities on plant debris washed ashore; 11: dwarf salt scrub; 12: dune grassland; 13: flood-tidal delta; 14: flood channel; 15: ebb channel; 16: fossilised shoal; 17: relict shoal; 18: ebb shield (in chronological order of formation); 19: advancing seagrass meadow; 20: patches of marsh flat; 21: low marsh retreat; 22: current-eroded marsh micro-cliff; 23: colonisation front of *Spartina* swards; 24: botanical transect (fig. 4).



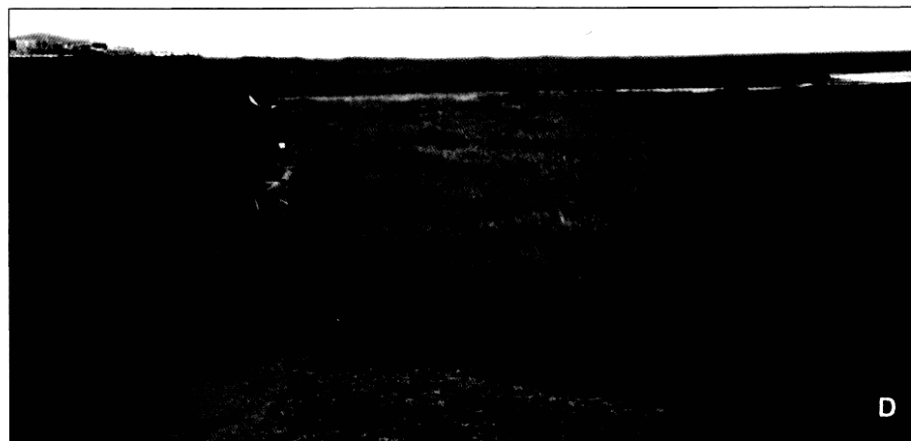
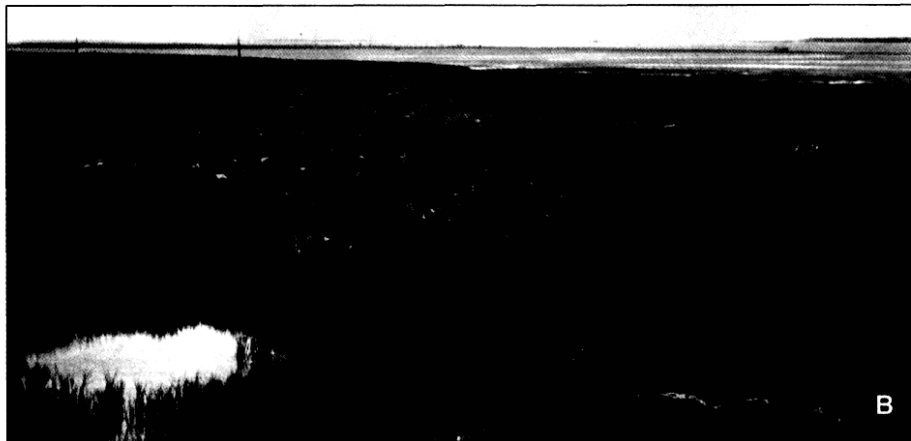


Fig. 3 – **Physionomies du marais à différentes phases de son évolution** (Clichés F. Bertrand).

A) Édification du schorre en système ouvert sur l'estran (station BN 13). Opposition entre des interfluves convexes couverts de végétations pionnières à *Spartina maritima* et des chenaux ensablés. Les rides de courant témoignent d'un hydro-dynamisme contrariant la progression de la végétation.

B) Frange inférieure du schorre (station BN 12) montrant le rôle de l'élévation du substrat sur la dynamique végétale. La progression des *Spartina* a respecté quelques zones nues résiduelles sous forme de dépressions primaires. Celles-ci se maintiennent en dépit de l'extension progressive du marais et de la substitution d'*Arthrocnemum perenne* à *Spartina maritima*.

C) et D) Niveau moyen du schorre (station BN 22) dominé par un tapis prostré d'*Arthrocnemum perenne* et des buissons d'*Arthrocnemum fruticosum*. La surface du marais est entaillée à partir du chenal latéral conquérant. L'éboulement des berges a entraîné la formation de dépressions secondaires où l'alternance de périodes d'humectation et de dessiccation crée des contraintes pour la végétation.

Fig. 3 – **Physionomic features at distinct stages of marsh development** (Photo F. Bertrand).

A) Early stages of a marsh open to the shoreface (near plot BN 13). *Spartina* progresses from patches on undulating ridges towards sand channels. This lateral growth concentrates flow into drainage channels. As suggested by current ripples, tidal and wave energy are, however, too high to allow permanent plant colonisation.

B) Low levels of well-established marsh (near plot BN 12) showing the importance of marsh elevation in determining plant succession and zonation. Uneven colonisation of the marsh has resulted in the enclosure of some bare areas where water has been trapped. These primary pans have persisted although *Arthrocnemum perenne* (a perennial) has taken advantage of the continuous supply of sediments and outdominated *Spartina*.

C) and D) Mean levels of mature marsh (near plot BN 22) dominated by perennial prostrate *Arthrocnemum*. The two-way flow system has encroached on the entire channel network. Tributary creeks controlled by ebb currents have been dammed under the effects of undercutting and slipping. Resulting secondary pans experience anoxic conditions during spring tides or the wet season and hypersalination during the dry season. Note the absence of vegetation on the surface layer of mud.

graphiques (fig. 4). Seules les accumulations sableuses de la rampe de flot situées au nord-ouest du transect sont recouvertes par un tapis discontinu mais relativement étendu de *Spartines pionnières* (*Spartina maritima*). Au total, la structure du couvert végétal du bas estran de front d'écu suggère, suivant le schéma communément admis, un environnement hydrodynamique plus énergétique qu'en arrière de l'écu.

Les perturbations induites par l'ouverture de la passe

La photographie aérienne acquise le 16 janvier 1999 (Mission UAGA-F, n° 13160), environ un an et demi après l'ouverture de la passe et dans des conditions marégraphiques sensiblement équivalentes (BM + 2h25) à celle du 30 août 1996, met en évidence l'importante accumulation sableuse mise en place du côté de la lagune sous l'effet de l'élargissement de la passe et du piégeage des matériaux en transit le long de la côte (Vila *et al.*, 1999). La superposition des contours de l'éventail deltaïque à ceux des unités du bas estran de 1996 (fig. 2) montre que la progradation deltaïque a été largement conditionnée par la topographie existante. Les bancs sableux longitudinaux ont bloqué la progression du delta dans l'axe du goulet en y favorisant la construction d'écus de jusant et en obligeant l'excès de charge sableuse véhiculé par le flot à emprunter les chenaux latéraux. Il s'ensuit que les formations à *Spartines* (*Spartina maritima*), végétations pionnières de bas estran, ont été moins ensablées dans l'axe du goulet qu'au voisinage des chenaux et que la tendance est à l'irrégularisation de cette zone frontale du marais.

À l'échelle de l'ensemble du secteur en eau libre, la formation d'une vaste rampe de flot dissipatrice d'énergie a pu créer momentanément des conditions d'habitat lagunaire en avant des schorres. En témoignent le maintien d'un front de schorre massif ainsi que la densification des touffes annulaires de *Spartines* (fig. 3A). Mais l'érosion latérale des berges du chenal, observée au nord du marais à partir de juillet 2000 et déjà détectable sur la photographie de 1999, indique que l'effet dissipateur de la rampe de flot n'a pu s'exercer longtemps et également sur toute l'étendue du marais frontal. Cette dissymétrie d'évolution semble devoir

être reliée au comblement plus marqué du chenal latéral occidental et donc à la réduction de sa capacité de chasse au jusant par rapport à celle du chenal oriental. La capture d'une partie du prisme de jusant par ce dernier expliquerait ainsi l'élargissement du chenal longitudinal accompagné par l'exhumation et l'érosion de la vasière précédemment ensevelie sous la rampe de flot (fig. 2). Cette évolution des conditions hydrodynamiques en avant du schorre doit être replacée dans le cadre de l'évolution plus générale du fonctionnement de la passe et du goulet de marée sur lequel s'articulent les branches spécialisées du flot et du jusant à l'intérieur de la lagune.

Le conditionnement météo-marin de la circulation sableuse en avant des marais

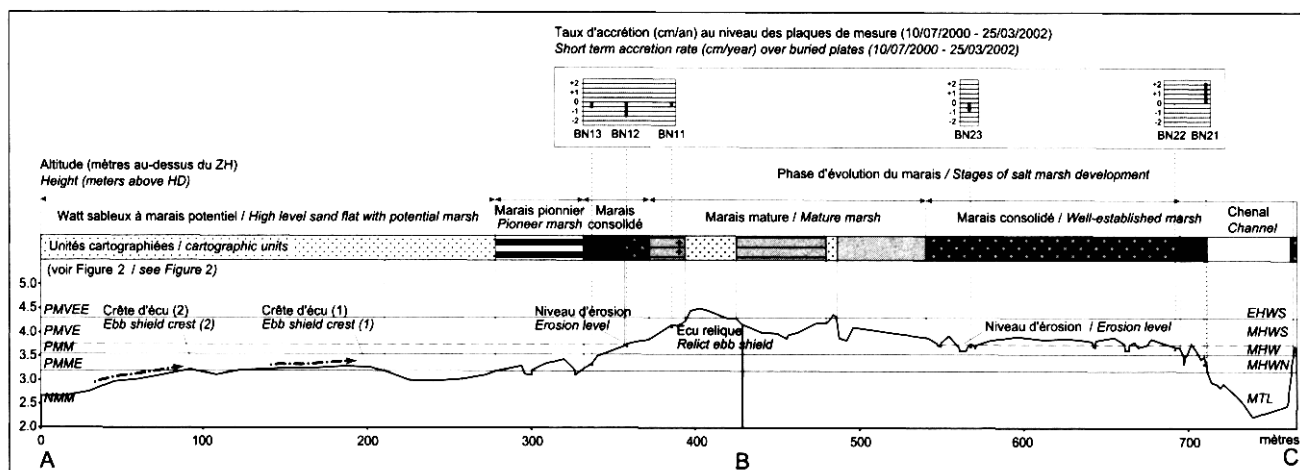
Conditions initiales de construction du delta de flot

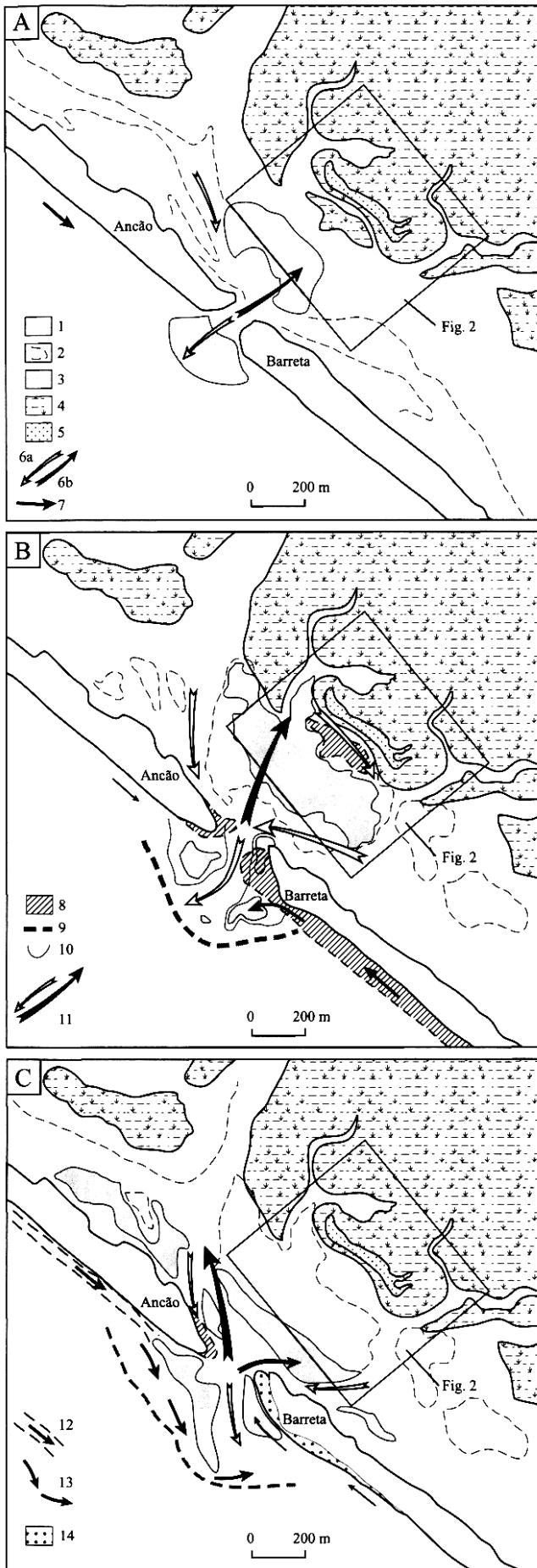
Acquise trois mois après l'ouverture de la passe, l'image du 21/09/1997 présente deux accumulations disposées de façon quasi symétrique par rapport à l'axe d'une passe déjà bien individualisée (fig. 5A). Bien que plus étalé en raison des faibles profondeurs sur lesquelles il a progradé, le delta construit du côté de la lagune est moins volumineux que celui qui se met en place à l'extérieur et dont seul le lobe terminal émerge à marée basse. Cette morphologie générale typique d'une passe tidale dominée par l'action de la marée s'accompagne, dans le détail, du recourbement vers la lagune des accumulations distales de la flèche d'Ancão, ce qui entraîne un léger décalage vers l'est de l'axe du goulet par rapport à l'axe général de la passe.

Dans le contexte de la dominance relative des flux d'ouest, toutes forces confondues au cours des deux trimestres écoulés (fig. 6), ce dispositif montre que le delta de jusant en cours d'édification n'a pas encore un pouvoir dissipateur suffisant pour amortir l'énergie incidente des vagues et entraîner le stockage des matériaux en transit sous forme de plates-formes de déferlement. Les matériaux transportés

Fig. 4 – Transect des marais de delta de flot de Barra Nova (niveaux rapportés au zéro hydrographique).

Fig. 4 – Cross-section through the Barra Nova flood tidal delta marshes (levels refer to hydrographic datum).





vers l'embouchure par la dérive dominante d'ouest sont transférés directement au delta de flot suivant la direction dictée par l'axe du goulet de marée. Ils se déposent ainsi préférentiellement en avant du marais constitué où la dissipation des courants sur la rampe de flot assure la conservation de conditions de faible énergie.

Conditions de spécialisation des branches de flot et de jusant

L'interprétation de l'image du 18/12/1999 met en évidence une tout autre configuration (fig. 5B). Les accumulations de flot se sont largement étendues en direction du nord-ouest de la lagune tandis que l'axe du goulet a subi une rotation anti-horaire d'environ 45°. La morphologie de la passe est très voisine de celle décrite par Y. Balouin (2001) comme prévalant lors des conditions "de beau temps post-tempête", c'est-à-dire des plates-formes de déferlement largement étendues vers le large et un chenal axial amorçant une rotation vers l'ouest sous l'effet d'une giration horaire des courants de jusant due à la force de Coriolis. La dominance de ces derniers est soulignée par le recourbement vers le chenal de l'accumulation distale de Barreta ainsi que par l'allongement des flèches de jusant sur les bordures de l'éventail de flot.

L'analyse des conditions météo-marines au cours de l'année écoulée permet de relier cette morphologie à une prolongation pluri-trimestrielle des conditions de faible agitation, nonobstant les modifications momentanées causées par des épisodes tempétueux de sud-ouest tels ceux des 23 et 24 mars ou du 20 octobre 1999 (fig. 6). On note toutefois que la scène a été acquise au terme d'un trimestre au cours duquel la fréquence des flux d'est a très sensiblement augmenté au point d'égaliser celle des flux d'ouest. Dans ces conditions, la migration de la partie externe du chenal nous semble devoir être imputée autant, sinon davantage, à une accumulation préférentielle sur la partie orientale du delta de marée en fonction d'un renforcement de la dérive d'est qu'à un ajustement du chenal et de la plate-forme occidentale à la déviation vers la droite des courants de jusant. Un mécanisme de migration

Fig. 5 – Évolution morphologique de la passe de Barra Nova, d'après l'imagerie SPOT. A) Conditions de renforcement des flux d'Ouest (d'après l'image SPOT, KJ : 027-275, 21/09/1997) ; B) Conditions d'affaiblissement des flux d'Ouest (d'après l'image SPOT, KJ : 028-275, 18/12/1999) ; C) Conditions de renforcement conjugué des flux d'ouest et d'est (d'après l'image SPOT, KJ : 027-276, 18/07/2000). 1 : cordon ; 2 : banc intertidal ; 3 : banc subtidal ; 4 : marais salé ; 5 : ancien écu de jusant ; 6 : courants alternatifs de jusant (a) et de flot (b) ; 7 : dérive d'estran ; 8 : érosion ; 9 : lobe terminal de delta ; 10 : plate-forme de déferlement ; 11 : variation de vitesse des courants ; 12 : dérive subtidale ; 13 : by-pass ; 14 : accumulation.

Fig. 5 – Morphological changes of the Barra Nova inlet as detected by SPOT satellite data. A) Increased westerly fluxes (from SPOT image, KJ: 027-275, 21/09/1997); B) Decreased westerly fluxes (from SPOT image, KJ: 028-275, 18/12/1999); C) Increased westerly fluxes (from SPOT image, KJ: 027-276, 18/07/2000). 1: barrier spit; 2: intertidal shoal; 3: subtidal shoal; 4: salt marsh; 5: relict ebb shield; 6: ebb (a) and flood (b) currents; 7: longshore drift; 8: shoreline recession; 9: terminal lobe of flood tidal delta; 10: wash platform; 11: variation in current velocity; 12: subtidal drift; 13: sediment bypassing; 14: deposition.

des sédiments à travers la partie la plus externe du chenal et suivant une direction est-ouest (*by-pass*) n'est alors pas à exclure même si la position marginale de ces transferts par rapport à la passe les cantonne en dehors du champ d'action du goulet de marée et les préserve d'une remobilisation vers l'intérieur de la lagune. En tout état de cause, l'énergie des vagues de sud-est paraît insuffisante pour transférer directement au delta de flot les accumulations distales de l'île de Barreta et elle vient plutôt épauler le flot qui se propage en direction du chenal interne occidental. Bénéficiant d'une puissance accrue, celui-ci préside à la remise en mouvement et au transport des sédiments de la rampe de flot vers le nord, suivant une direction imposée par la déviation de l'axe du goulet, au cours des périodes à flux d'ouest modéré de l'hiver précédent (Balouin, 2001). Cette dynamique, amorcée comme le montre la photographie aérienne de janvier 1999 dès l'affaiblissement des flux d'ouest, entraîne la rotation des accumulations de flot vers le nord-ouest et l'inscription des marais de Barra Nova en bordure d'un chenal préférentiel de retour de jusant.

Conditions de modification de la circulation sableuse

Une troisième image a été prise dans des conditions de renforcement et d'augmentation relatifs des flux d'ouest similaires à celles qui ont prévalu trois ans auparavant, après l'ouverture de la passe (fig. 6). L'interprétation de cette image du 18/07/2000 (fig. 5C) fait d'abord ressortir un net rétrécissement de la passe par rapport à l'hiver précédent. Cette évolution est provoquée principalement par l'accrétion de la pointe de Barreta dans la mesure où l'extrémité de la flèche d'Ancão continue d'enregistrer un recul vers l'ouest. Simultanément, la flèche de la plate-forme de déferlement occidentale s'est allongée et recourbée vers l'est au point que la partie externe du chenal de jusant s'étire parallèlement à l'extrémité de Barreta. L'étranglement de la partie médiane de la dite flèche laisse entrevoir le creusement d'une brèche par le courant de jusant sous la contrainte non seulement de l'allongement distal de l'île de Barreta mais également de la

rotation du chenal externe. Suivant un enchaînement de processus proche du modèle de rupture de delta de jusant (Fitzgerald, 2001), la réfraction des vagues autour du lobe terminal du jusant entraîne une redistribution active des sédiments de l'amont à l'aval du delta (*by-pass*) où ceux-ci se déposent sous forme de barres plus ou moins accolées à l'île-barrière de Barreta.

Cette nouvelle source sédimentaire, située au voisinage immédiat du goulet, est bien visible sur l'image du 18/07/2000. Mais elle paraît absente sur l'image du 15/06/2000 où les différences de réflectance entre les deux flancs des crêtes de houle orientées O.S.O.-E.N.E ont permis, par ailleurs, de mettre en évidence un court mais intense épisode de flux d'est (Bertrand *et al.*, 2001). La variation du stock sédimentaire à l'entrée de la passe ainsi que la mobilité des bancs subtidaux dans la lagune conduisent à penser que le stock sableux constitué sur la plate-forme aval externe ne participe pas seulement à l'accrétion de la pointe de Barreta mais qu'il alimente également, à l'occasion d'épisodes tempétueux d'est, un transfert important de sédiments vers la lagune. L'intervention des flux d'est dans le système hydrosédimentaire de la lagune est rendue possible par l'établissement, sur une période suffisamment longue, d'un régime d'ouest permettant la constitution d'une réserve sédimentaire (stockage) susceptible d'être libérée (déstockage) sur de plus courtes périodes. C'est ce relais de processus emboîtés dans le temps qui semble en mesure de rendre compte de la construction et de la recharge périodique d'un delta de flot dans une passe dominée globalement par le jusant depuis son ouverture.

La comparaison des images satellite (fig. 5B et 5C) montre une évolution notable de la répartition des bancs sableux en avant du marais. L'allongement des barres marginales sur la face interne de l'île de Barreta et sur la bordure orientale de la rampe de flot ainsi que le sectionnement de l'ancienne flèche occidentale de jusant indiquent une accumulation préférentielle des sédiments apportés par le flot le long du chenal oriental et une remobilisation des accumulations

bordant le chenal occidental. Cette bifurcation partielle du flot se double d'une différenciation beaucoup plus nette de la limite séparant à mi-marée les parties émergées et immergées de l'estran, particulièrement le long de la rampe de flot. L'ensemble de ces changements tend à montrer que le chenal occidental qui était jusque là en situation d'ex-

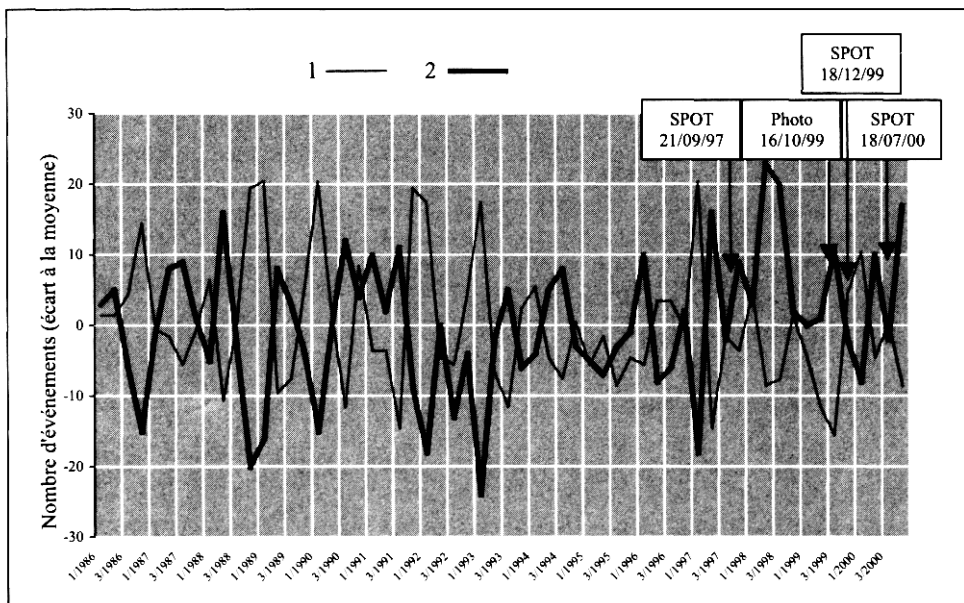


Fig. 6 – Variations trimestrielles des flux d'est (1) et d'ouest (2).

Fig. 6 – Quarterly variations of westward (1) and eastward (2) fluxes.

cès de charge a été largement réactivé, en liaison avec le détournement des accumulations de flot vers le sud de la lagune et la capture simultanée du prisme de jusant de l'ensemble du cul-de-sac occidental. Ce faisant, les marais adjacents de Barra Nova se trouvent en situation plus marginale par rapport à la passe.

Au total, la mise en relation de l'évolution de la passe avec la variabilité des conditions météo-marines montre que le contexte de circulation sableuse en avant des marais de Barra Nova demeure hautement instable, trois ans après l'ouverture de la passe, en dépit de la stabilité de la position de celle-ci. La question est alors de savoir dans quelle mesure cette instabilité affecte la dynamique des marais adjacents et si le fonctionnement de ces derniers peut s'intégrer dans le système de fonctionnement général de la passe. Pour répondre à cette question, un protocole de suivi sédimentaire a été établi dans le schorre oriental de Barra Nova.

Les conséquences sur la dynamique des marais

Un abaissement irrégulier de la surface des schorres

Le traitement des données acquises au cours de quatre campagnes réparties sur un peu moins de deux années (du 10/07/2000 au 25/03/2002) montre, à l'exception d'une forte accrétion récente (2,2 cm/an) du bas schorre à Spartines d'arrière-écu (Station BN 21), une tendance générale à l'abaissement de la surface du marais. Bien que reposant sur un nombre réduit de mesures, quatre au total, qui plus est irrégulièrement espacées dans le temps, les courbes d'évolution (fig. 7) suggèrent que cet abaissement n'est pas continu et ne suit pas, non plus, de variations intra-annuelles marquées, susceptibles d'être corrélées aux cycles de la marée. Le fait est patent au niveau des fronts de schorre (BN12, BN22) dont les courbes d'évolution erratiques sont à relier à l'instabilité des chenaux. Ces variations semblent également

dues, pour une bonne part, à l'évolution des niveaux plus internes de l'estran. En effet, on observe qu'entre mars 2001 et mars 2002, le ralentissement de l'érosion (BN13) et l'accélération de la sédimentation (BN21) enregistrés à la surface des prairies de Spartines (*Spartina maritima*) vont de pair avec une érosion accentuée des niveaux plus élevés (BN 12 et BN 23) qui présentent, par ailleurs, les taux d'érosion les plus significatifs (-1,6 et -0,85 cm/an) sur l'ensemble de la période. Malgré la situation très interne de la station BN 23 par rapport à la station BN 12, il n'est pas à exclure qu'une partie des matériaux silto-argileux constitutifs des marais (Andrade, 1990), libérés par l'érosion, aient pu être transportés et déposés au niveau du front de schorre par des écoulements de jusant.

En tout état de cause, le calage altimétrique des stations de mesures effectué grâce aux levés DGPS (fig. 3) montre que les processus d'érosion et de sédimentation sont liés à des niveaux altimétriques préférentiels. Ainsi, les stations soumises à une forte érosion (BN 12 et BN 23) sont situées exactement à la même altitude (3,76 m et 3,78 m), tandis que les stations BN 21 et BN 13, situées respectivement à 3,43 m et 3,33 m, qui ont enregistré une accrétion au cours de la dernière année de mesure, ont moins de 10 cm d'écart d'altitude. La limite inférieure du tapis continu de Spartines (*Spartina maritima*) ne présente pas non plus de variation significative suivant que l'on se situe en front (3,21 m) ou en arrière d'écu (3,17 m). Ces similarités d'altitude montrent que les conditions d'exposition des deux marais aux agents hydrodynamiques ne sont pas sensiblement différentes et que la distance à la passe ne joue pas, en définitive, un rôle essentiel.

Une dynamique contrôlée davantage par la marée que par la divagation des chenaux

Le facteur déterminant réside plutôt dans les variations des vitesses d'écoulement suivant la hauteur d'eau de la marée et les modalités d'écoulement des flux. Deux faits sont alors à considérer pour l'interprétation des cotes 3,77-3,78 m et 3,21-3,17 m qui ont été énoncées précédemment. Le premier est l'asymétrie des vitesses de courants telle qu'elle a été établie dans la passe de Barra Nova où les courants de jusant atteignent des vitesses de 1,2 m/s peu après la renverse alors que les maxima de flot ne

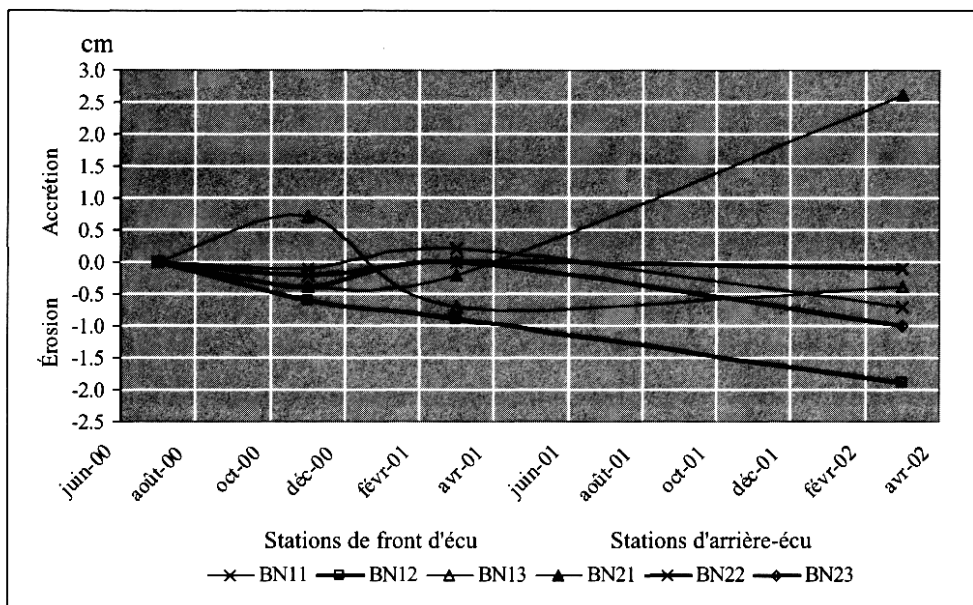


Fig. 7 – Évolution verticale de la surface des marais de Barra Nova.

Fig. 7 – Vertical changes in surface height of Barra Nova marshes.

dépassent pas 0,6 m/s à mi-marée montante (Salles, 2000 cité par Balouin, 2001). Si l'on admet que cette asymétrie ne peut-être qu'accentuée dans les marais, du fait de l'effet retardateur de ceux-ci sur la propagation des flux, on peut penser que ces deux cotes correspondent, comme en d'autres marais situés à proximité de passes tidales, aux niveaux auxquels les courants de flot et de jusant atteignent leur vitesse maximale (Pye, 1992). La seconde remarque tient au fait que la cote "d'érosion" 3,77 m se situe à l'intérieur du marais constitué alors que la cote "d'accumulation" - au moins relative - 3,20 m se situe sous la bordure externe du schorre, dans le lit d'un chenal bordier bien individualisé. Dans ces conditions, les marques d'érosion (effondrement de berge, cuvette en "forme de ruban") qui accompagnent l'abaissement de la surface du schorre peuvent être interprétées comme le produit combiné de l'étalement du flot (*sheet flow* des auteurs anglo-saxons) lors de la submersion de la rive et de l'action incisive du jusant, lorsque l'abaissement du plan de la marée au-dessous de la surface du marais provoque un recul de la tête des chenaux élémentaires, suivant le schéma classique de l'érosion régressive dans les matériaux vaseux (Verger, 1988).

Les variations erratiques du rythme de sédimentation autour de la cote 3,15-3,20 m pourraient marquer, quant à elles, l'instabilité des modalités d'écoulement du jusant de type, tour à tour, turbulent, donc propice à l'abaissement de la surface, et laminaire, plutôt favorable au dépôt des matériaux fins (limons, argiles) transportés.

Au-delà des variations d'accrétion constatées, les formes de dissection du schorre montrent bien que l'ensemble du bas schorre de Barra Nova évolue depuis l'ouverture de la passe, davantage en fonction de l'action transversale du flot et du jusant que de celle, tangentielle, des chenaux de marée. Ces conditions sont dictées par l'instabilité persistante des bancs sableux en avant du schorre et aux difficultés de réorganisation du réseau hydrographique. Sans préjuger de l'évolution future, le couplage de ces résultats sectoriels avec l'analyse rétrospective des changements détectables par l'imagerie aérienne et satellitaire permet d'ores et déjà d'apporter quelques éléments de compréhension au fonctionnement des marais de delta de flot en restituant leur dynamique dans le contexte élargi de l'évolution de la passe dont ils sont tributaires.

Éléments pour une modélisation du fonctionnement des marais d'arrière-barrière

La dynamique sédimentaire et l'évolution des marais de delta de flot est conditionnée au premier chef par l'intensité des échanges sableux entre la lagune et l'Océan, suivant la dominance de la houle ou de la marée à l'embouchure de la lagune. Le caractère nettement dominant du jusant dans la passe de Barra Nova tel qu'il a pu être établi à partir de modèles hydrologiques (Salles 2000, cité par Balouin, 2001 ; Williams *et al.*, 2003) ne doit pas conduire à négliger les transferts de sédiments vers l'intérieur de la lagune dès lors que le flot est épaulé par les courants dérivés des vagues à la côte à l'occasion d'épisodes météo-marins de

forte énergie susceptibles de se prolonger sur plusieurs cycles de marée.

Évolution à court terme

Le fonctionnement sédimentaire de l'ensemble des marais de Barra Nova apparaît fortement perturbé par les variations volumétriques et surfaciques des accumulations deltaïques de flot liées au renforcement périodique des flux d'est et à la remobilisation d'un stock constitué à l'aval de la dérive dominante de la passe. Ces perturbations sont liées directement à la désorganisation périodique du réseau hydrographique initial sous l'effet du comblement sableux des chenaux et de la diminution momentanée du prisme de marée. Mais elles s'expriment différemment suivant la position des marais par rapport au siège des accumulations.

Ainsi, les parties basses de l'estran, progradées occasionnellement par les accumulations de sable moyen voire grossier, bénéficient, le plus souvent, de conditions d'abri favorables à une colonisation primaire de la haute slikke par des *Spartines* pionnières dès que la cote 3,20 m est dépassée. Les parties plus élevées du schorre silto-argileux, exposées à des écoulements concentrés ou en filets beaucoup plus rapides, subissent, quant à elles, une érosion entraînant une irrégularisation de leur surface et une évolution régressive de la végétation. Cette dynamique tend à élargir à court terme le spectre biologique des parties inférieure et moyenne du schorre en introduisant une hétérogénéité floristique et structurale à un niveau bionomique issu de l'évolution *in situ* d'une haute slikke antérieure.

Cette dynamique contrastée du marais s'écarte sensiblement du schéma classique des marais d'arrière-barrière dominés par l'action de la marée et selon lequel l'accrétion augmente en fonction directe de l'élévation du substrat (French *et al.*, 1993). Elle est liée au contexte hydrodynamique actuel d'une passe où l'action des houles l'emporte périodiquement sur celle de la marée.

Évolution à long terme

L'évolution des marais a toute chance d'être contrôlée par la migration cyclique de la passe vers l'est (Dias, 1988 ; Pilkey *et al.*, 1989 ; Vila *et al.*, 1999 ; Vila-Concejo *et al.*, 2002), et par la soustraction progressive des marais d'arrière-barrière à l'action de la houle suivant le schéma classique d'évolution des marais de delta de flot (Moslow, 1985). La stabilisation du volume de l'embouchure dès la fin de l'année 1998 a pu faire penser que son développement était terminé et qu'ainsi la migration de la passe était entamée (Vila, 1999). Cinq campagnes de terrain conduites entre 2000 et 2002, à six mois d'intervalle, ont permis d'observer qu'en dépit de certaines variations de sa géométrie, notamment de sa largeur, la passe de Barra Nova est demeurée plutôt stable dans sa position. On en déduit que cinq années après l'ouverture de la brèche, l'évolution se situe encore au stade "d'ajustement initial" des passes (Vila-Concejo, 2002). Les causes de cette stabilité prolongée sont très probablement à rechercher dans l'allongement durant l'année 2000, comme, du reste, au cours des quatorze dernières années, de la durée des épisodes tempétueux engendrant des vagues de

hauteur significative supérieure à 2,5 m (fig. 8) ; en effet ces épisodes, qu'ils soient d'ouest ou *a fortiori* d'est, favorisent l'accumulation et le renouvellement d'un important stock sédimentaire à l'extrémité de l'île de Barreta. Par un effet rétroactif, la stabilité de la passe pourrait également être assurée par le déstockage de la plate-forme de déferlement de Barreta en direction de la lagune, ce qui limite les possibilités de transfert de sédiments le long de la côte et la migration de l'embouchure.

Conclusion

Le suivi physiographique et sédimentaire des marais de Barra Nova montre que, conformément au schéma communément admis, leur dynamique est associée au fonctionnement général de la passe dès lors que celle-ci connaît une phase de stabilité suffisamment longue pour autoriser des échanges sableux transversaux. Bien que situés en marge de la passe, ces marais n'en constituent pas moins une entité à part entière du système, soumise aux effets d'accumulation ou d'érosion liés aux variations saccadées d'apports sédimentaires à travers la passe. Une quantification des transferts de sédiments vers l'intérieur de l'embouchure en période de forte énergie de houle et suivant un pas de temps plus court pourrait conduire à mieux en apprécier le bilan sédimentaire global. La poursuite du suivi sédimentaire et météo-marin de la passe devrait permettre de déterminer si le renforcement et/ou l'allongement des événements tempétueux perdure et entraîne une évolution régressive du schorre ou si la restauration de conditions de faible énergie, tributaire d'une stabilisation préalable des atterrissements sableux et propice au dépôt des vases remises en suspension, est susceptible de rétablir l'évolution progressive du marais qui prévalait avant l'ouverture de la passe.

Références

- Andrade C.F. (1990)** – *O ambiente de barreira da Ria Formosa, Algarve, Portugal*. PhD Thesis, Université de Lisbonne, 645 p.
- Balouin Y. (2001)** – *Les embouchures mésotidales (tidal inlets) et leur relation avec les littoraux adjacents : l'exemple de la Barra Nova, Algarve, Sud Portugal*. Thèse, géologie marine, université de Bordeaux 1, 299 p.
- Balouin Y., Howa H. (2002)** – Sediment transport pattern at the Barra Nova inlet, south Portugal: a conceptual model. *Geo-Marine Letters*, 21, 226-235.
- Baron-Yellès N., Bertrand F., Goeldner-Gianella L., Costa S., Arnaud-Fassetta G., Beltrando G., Davidson R. (2003)** – Enjeux et limites de la gestion environnementale d'un marais lagunaire d'Europe méridionale (Algarve, Portugal). *L'Espace Géographique*, 1, 31-46.
- Bertrand, F., Costa S., Beltrando G. (2001)** – Complexité et vulnérabilité de l'hydrosystème lagunaire de la Ria Formosa (Algarve, Portugal). Actes du colloque *Hydrosystèmes, Paysages, Territoires*, 6-8 septembre 2001, Lille, CD-Rom.
- Bettancourt P. (1994)** – *Les environnements sédimentaires de la côte sotavento (Algarve, Sud Portugal) et leur évolution holocène et actuelle*. Thèse, géologie marine, université Bordeaux 1, 2 vol., 289 et 146 p.

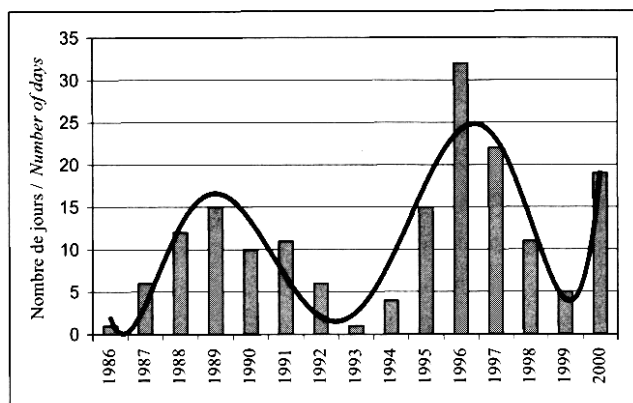


Fig. 8 – Nombre de jours par an durant lesquels la hauteur des vagues est supérieure ou égale à 2,5 m.

Fig. 8 – Number of days during which wave height ≥ 2.5 m.

- Bonnot-Courtois C., Levasseur J.-E. (2000)** – *Projet de "rétablissement du caractère maritime du Mont-Saint-Michel"*. *Études en environnement. Volume 5 : Contribution à la connaissance de la dynamique des herbues*. Université de Rennes 1, Laboratoire de géomorphologie et Environnement littoral EPHE (Dinard), UMR PRODIG, 196 p.
- Brown S.L. (1998)** – Sedimentation on a Humber saltmarsh. In Black K.S., Paterson D.M., Cramp A. (Eds), *Sedimentary processes in the intertidal zone*. Geological Society Special Publication, 139, 69-84.
- Dias J.M.A. (1988)** – Aspectos Geológicos do Littoral Algarvio. *Geonovas*, Lisboa, 10, 113-128.
- Géhu J.-M. (1979)** – Réflexions et observations sur le classement des végétations halophiles européennes. In Huiskes *Vegetation between land and sea*. Dordrecht, *Geobotany*, 11, 134-143.
- Fitzgerald, D.M. (1988)** – Shoreline erosional-depositional processes associated with tidal inlets. In Aubrey D.G., Weishar L. (Eds), *Lecture notes on coastal and estuarine studies: Hydrodynamics and sediment dynamics of tidal inlets*. New York, Springer-Verlag, 29, 186-224.
- Fitzgerald D.M. (1996)** – Geomorphic Variability and Morphologic and Sedimentologic Controls on Tidal Inlets. *Journal of Coastal Research*, SI, 23, 47-71.
- Fitzgerald, D.M., N. C. Kraus, Hands E.B. (2001)** – *Natural Mechanisms of Sediment Bypassing at Tidal Inlets*. Coastal Engineering Technical Note US Army Corps of Engineers ERDC/CHL CETN-IV-30. Army Engineer Research and Development Center, Vicksburg, MS., 10 p. (<http://ch.wes.army.mil/library/publications/chetn>).
- French J.R., Spencer T. (1993)** – Dynamics of sedimentation in a tide-dominated backbarrier salt marsh, Norfolk, UK. *Marine Geology*, 111, 315-331.
- French J.R., Spencer T., Murray A.L., Arnold N.S. (1995)** – Geostatistical Analysis of Sediment Deposition in Two Small Tidal Wetlands, Norfolk, U.K. *Journal of Coastal Research*, 11, 2, 308-321.
- Hayes M.O. (1980)** – General Morphology and Sediment Patterns in Tidal Inlets. *Sedimentary Geology*, 26, 1/3, 139-156.
- Mehta A.J., Finkl C.W. Eds (1996)** – Understanding Physical Processes at Tidal Inlets. *Journal of Coastal Research*, SI 23, 1-136.

- Moslow T., Tye R. (1985)** – Recognition and characterisation of Holocene tidal inlet sequences. *Marine Geology*, 63, 129-151.
- Oertel G.F. (1988)** – Processes of sediment exchange between tidal inlets, ebb deltas and barrier islands. In Aubrey D.G., Weishar L. (Eds), *Lecture notes on coastal and estuarine studies: Hydrodynamics and sediment dynamics of tidal inlets*. New York, Springer-Verlag, 29, 297-318.
- Pilkey Jr O.H., Neal W.J., Monteiro J.H., Dias J.A. (1989)** – Algarve barrier islands: a non coastal-plain system in Portugal. *Journal of Coastal Research*, 5, 2, 239-261.
- Pye K. (1992)** – Saltmarshes on the barrier coastline of North Norfolk, eastern England. In Allen J.R.L., Pye K., *Saltmarshes Morphodynamics, Conservation and Engineering Significance*, 148-177.
- Salles P. (2000)** – *Hydrodynamics controls on multiple tidal inlet persistence*. PhD Thesis Massachusetts Institute of Technology and Woods Hole Oceanographic Institution, 266 p.
- Sha L.P., Van den Beerg J.H. (1993)** – Variation in ebb-tidal delta geometry along the coast of the Netherlands and the German Bight. *Journal of Coastal Research*, 9, 730-746.
- Verger F. (1988)** – *Marais et wadden du littoral français*. Paradigme, Caen, 3^e édition, 549 p.
- Vila A., Dias J.M.A., Ferreira Ó., Matias A. (1999)** – Natural evolution of an artificial inlet. *Coastal Sediments '99*, 2, 1478-1488.
- Vila-Concejo A., Marias A., Ferreira Ó., Duarte C., Dias J.M.A. (2002)** – Recent Evolution of the Natural Inlets of a Barrier Island System in Southern Portugal. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 36, 741-752.
- Williams J.J. et al. (2003)** – Tidal Inlet Function: Field Evidence and Numerical Simulation in the INDIA Project. *Journal of Coastal Research*, 19, 1, 189-211.

Article reçu le 10 avril 2003, accepté le 18 juillet 2003