
Un exemple d'aide à la gestion environnementale : la spatio-carte des marais littoraux de la Ria Formosa (Algarve, Portugal)

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

* UMR 8586 PRODIG, 191 rue Saint-Jacques, 75005 Paris

** UMR 6554 LTEG, Esplanade de la Paix, 14032 Caen Cedex

RESUME. Dans le cadre d'une recherche géographique portant sur la vulnérabilité des marais lagunaires de la côte d'Algarve (Portugal méridional), l'article présente la méthodologie suivie pour la réalisation d'une spatio-carte à moyenne échelle (1:20 000). Un fond-image a été préparé à partir de données multispectrales SPOT P + XS restituées en pseudo-couleurs naturelles et partiellement interprétées à l'aide d'une classification automatique des états de surface des marais. Les informations apportés à l'image de base ont trait aux propriétés et à la configuration des phénomènes biophysiques et humains tels qu'ils sont perçus à la fois par les chercheurs et les praticiens de l'environnement. Le produit cartographique réalisé présente non seulement un format d'intégration opérationnel avec un SIG mais également une plus value thématique et participative à l'analyse spatiale des enjeux environnementaux de la lagune.

ABSTRACT. A multidisciplinary team of six geographers has undertaken a project to analyse the vulnerability of barrier island salt marshes of the Algarve Coast, in South Portugal. In order to put environmental change over an image backdrop, SPOT XS and SPOT Panchromatic data were merged to create a true color image which has high resolution of the Spot Panchromatic data (10 meter), together with easy interpretation of the true color mode. Overlaid on this are an unsupervised classification highlighting the different marsh habitat and selective informations related to biophysical and human phenomena as they are perceived to the time by researchers and environmental planners. This satellite-based imagemap provides a format of operational integration with a GIS as well as a precious tool for the spatial analysis of environmental change within the coastal lagoon.

MOTS-CLES : Spatio-carte, environnement, marais littoraux, gestion, télédétection.

KEY WORDS : Imagemap , environment, saltmarshes, land management, remote sensing.

1. Objectifs et cadre de l'étude

Dans le cadre d'un projet de recherche appuyé par une aide du CNRS, une équipe pluridisciplinaire de sept géographes tente de cerner la place des actions environnementales (protection de la nature, défense côtière) dans la dynamique évolutive d'un marais lagunaire du sud du Portugal, représentatif des enjeux auxquels sont soumis les marais littoraux d'Europe occidentale (urbanisation, développement touristique, élévation du niveau marin) [BER 00]. A travers la production de documents cartographiques utilisant la télédétection satellitaire et susceptibles de servir de référence pour la confection de documents réglementaires, l'objectif de ce travail est de nourrir la dialogue entre chercheurs et gestionnaires de l'Environnement dans cette région en rapide transformation.

Une première phase de l'étude, consacrée à l'acquisition de données sous différents éclairages de la problématique posée a permis d'établir un diagnostic environnemental général à l'échelle de la lagune en combinant un inventaire cartographique des marais et une série de protocoles d'analyse dynamique et diachronique (sédimentologie, biogéographie, climatologie, occupation du sol) [BAR 02]. La seconde phase de l'étude, vouée à l'intégration des données, a pour objectif de présenter une vision d'ensemble, à la fois dynamique et interactive des marais qui puisse rendre compte des conditions de leur préservation à plus ou moins long terme compte tenu des contraintes environnementales en présence.

A titre préliminaire, il a semblé opportun de réaliser une carte de synthèse à relativement grande échelle (1/20.000), couvrant le secteur occidental de la lagune où les interactions Homme / Nature paraissent les plus complexes et la vulnérabilité des marais la plus élevée. Le choix s'est porté sur une spatio-carte dans la mesure où ce produit cartographique est parmi les plus élaborés dans le domaine des applications de la télédétection [AN 93].

2. La saisie des données

La vocation de la spatio-carte proposée est thématique. Le document cartographique a pour fond des données images acquises à la date du 21 octobre 1997 correspondant à la fois au début de nos investigations de terrain et à une période de développement très contrasté de la végétation halophile. Ces informations de base ont été avec les résultats spatialisés d'analyses portant plus spécifiquement sur certains aspects de la dynamique du milieu et de l'évolution des paysages.

2.1 Le fond image : une image "en vraies couleurs"

Le fond image, réalisé à l'aide du logiciel de traitement d'images ErMapper, est constitué par une composition colorée de données multispectrales SPOT XS réhaussée des données acquises en mode panchromatique à la même date du

21/10/97, à 11h33 T.U. Il s'agit donc d'un enregistrement acquis en situation marégraphique de basse marée de vive eau de façon à permettre une discrimination de toutes les formations végétales halophiles, y compris les herbiers de *Zostères* qui occupent la partie inférieure de l'estran (basse slikke).

Une restitution en "couleurs pseudo-naturelles" des données spectrales a été choisie de façon à faciliter l'interprétation visuelle du document sans nécessiter le recours à des descripteurs sémantiques spécifiques pour le fond d'image : routes habitations, fairways de golf sont directement identifiables. La méthode adoptée est celle qui consiste à obtenir une image en couleurs vraies (*true colors*) en visualisant le canal XS1 en bleu, le canal XS2 en rouge et la moyenne pondérée des canaux XS1 et XS3 (plutôt que XS2 et XS3 comme une image en couleurs naturelles *s.s.*) en vert. En outre, l'ajout du canal panchromatique a permis d'améliorer la résolution spatiale de l'image résultante à 10 m et, ce faisant, de rehausser les contours des objets au sol.

Le fond image ainsi constitué n'apparaît à la lecture du document que dans les limites des terres exondées du plateau côtier et des terres non végétalisées du marais (marais salants) ou du cordon dunaire (dune vive). Ce masquage géographique répond au souci de faire ressortir par effet de contraste l'extension actuelle des zones basses humides (la tonalité sombre et la structure quadrangulaire des marais salants les rangeant implicitement dans cet ensemble) et d'attirer l'œil de l'utilisateur vers la partie "codée" de l'image ayant fait, soit l'objet d'un traitement statistique et cartographique particulier, soit d'une explicitation graphique à l'aide de descripteurs propres.

2.2 La classification automatique de la végétation halophile

Les marais maritimes étant au cœur de la problématique environnementale posée, l'analyse de l'image s'est concentrée sur la partie non terrestre de la scène comportant l'avant-plage maritime, les marais arrière-littoraux plus ou moins convertis à un usage agricole, notamment dans le secteur du Ludo. Compte tenu de l'interférence particulière des effets de la végétation et des surfaces minérales souvent sableuses ou sablonneuses dans le champ du capteur, il est apparu nécessaire de croiser des variables correspondant chacune à une combinaison de réflectances spectrales permettant ainsi de minimiser les facteurs perturbateurs à l'étude d'une part des marais *s.s.* et, d'autre part, des estrans nus. La comparaison des indices de végétation a montré que l'écart des réflectances entre les domaines du visible (R) et du proche infrarouge (PIR) mesuré par le simple ration R / PIR rendait mieux compte des variations physionomico-structurales du couvert végétal que la différence normalisée NDVI souvent utilisée. De même, un indice dit "de cuirasse", utilisant l'écart de réflectance entre les deux sous-domaines du visible (Vert et Rouge), a permis d'obtenir des informations très utiles sur les variations granulométriques des estrans actuels et anciens. Très largement décorréélées entre elles ($r = -0,225$), ces deux néo-variables ont logiquement été retenues et croisées avec les données du

canal XS3 dans la mesure où celles-ci – bien que relativement corrélées avec l'indice de cuirasse ($r = 0,734$) – offrent une bonne vision de la structure hydro-géomorphologique du milieu.

Malgré une connaissance des objets au sol acquise au fil de nombreuses missions de terrain, la procédure de classification suivie n'a pas été dirigée par l'établissement préalable de zones d'apprentissage de façon à ne privilégier *a priori* aucun taxon et de rendre cette procédure facilement reproductible. Celle-ci repose donc sur des essais successifs et automatisés de segmentation de l'espace spectral ainsi construit. Le regroupement des signatures spectrales a été fixé à 25 de façon à disposer d'un ensemble de classes spectrales à la fois homogènes (faible inertie intraclasse) et correctement séparés (forte inertie interclasse) d'où l'on puisse extraire un nombre suffisant de classes significatives du point de vue bio-physique (18 au total). Au total, l'identification des segments a permis de distinguer un nombre égal (9) d'unités de paysage à dominante végétale et minérale, regroupées et représentées sous formes d'aplats opaques en 7 ensembles suivant leur parenté spectrale et taxonomique.

2.3 Les données environnementales en surcharge

Des informations qualitatives aidant à l'interprétation ou complétant les informations déjà présentes ont été ajoutées au document de base à l'aide des logiciels graphiques Adobe Illustrator et Adobe Photoshop. Ces informations ont trait exclusivement aux conditions susceptibles de modifier l'état ou la dynamique des marais de la Ria Formosa. Les données environnementales, majoritairement acquises au terme de protocoles d'étude du programme, couvrent trois grandes catégories de paramètres représentés sous forme d'aplats transparents et de figurés linéaires ou ponctuels. Il s'agit en premier lieu des phénomènes de dégradation et de défense de l'environnement, tels les phénomènes d'engraissement ou d'érosion du trait de côte, de contamination des nappes phréatiques ou l'établissement de stations d'épuration. Certains paramètres naturels de la dynamique de l'environnement comme le rapport fréquence / intensité des tempêtes ont été représentés dès lors que leur étude dans le cadre du programme APN Ria Formosa a donné lieu à des résultats significatifs. La seconde catégorie de paramètres concerne la structure et l'évolution des aménagements des marais couvrant la rive interne de la lagune. La superposition de l'image satellite de 1997 et des photographies aériennes de 1958 a permis de différencier, à l'aide de la variable visuelle texture-structure, les modalités d'avancée et de recul de la zone humide au cours des quatre décennies précédant notre diagnostic environnemental. Enfin, une attention particulière a été portée à la représentation des statuts de protection en vigueur depuis 1978 dans la mesure où ils définissent le cadre spatial théorique de protection et de gestion de l'environnement, dans ce secteur particulièrement exposé aux menaces de dégradation.

3. L'habillage de la carte

3.1 *La légende*

Compte tenu de la complexité relative du document proposé, la légende est composée de rubriques hiérarchisées remplaçant les résultats de la classification automatique et les données environnementales retenues dans le cadre physiographique général du secteur. Les figurés ont donc été répartis suivant les trois grands domaines en présence : le bas plateau côtier, la zone humide lagunaire et l'interface lagune / océan. La présentation des trois ensembles en colonne juxtaposée à l'image rappelle leur disposition emboîtée ainsi que la situation d'interface des marais lagunaires entre le continent et l'océan.

Pour cette zone à forte densité de population et en cours d'urbanisation rapide où les objectifs de la cartographie de l'environnement sont l'aménagement du territoire et la préservation des ressources renouvelables [JOU 86], la légende donne pour chaque ensemble un descriptif des aménagements les plus importants et des contraintes environnementales majeures.

Le fait que les processus identifiés comme facteurs de contraintes soient des processus naturels – essentiellement hydrochimiques ou hydrodynamiques - ne doit pas faire oublier qu'ils interfèrent directement (dans les marais) ou indirectement (par l'intermédiaire des bassins-versants) avec des actions humaines. Dans une région aussi humanisée, la notion de contrainte environnementale permet ainsi de dépasser la notion inopérente de contrainte naturelle.

Par ailleurs, on notera que certaines de ces contraintes sont loin d'être univoques. Ainsi, le confinement qui, à l'échelle de la lagune, augmente sensiblement les risques d'eutrophisation, peut localement favoriser la richesse halieutique dès lors que la production phytoplanctonique dans la partie supérieure des estrans profite à la macrofaune benthique (palourdes) des étages bionomiques inférieurs. De même, les débordements océaniques qui menacent d'ensevelissement les habitations dunaires sont susceptibles de créer de nouvelles assises sédimentaires pour le développement des marais sur la face interne des cordons. La notion de contrainte doit donc encore ici être relativisée à la mesure des préoccupations des populations locales.

3.2 *Les données annexes*

L'habillage de la carte comprend également des indications relatives à certains domaines de la zone humide ayant fait l'objet d'investigations particulièrement poussées. Cette information périphérique peut être scindée en deux entités. En premier lieu, un descriptif complet, transversal et vertical, du dispositif séquentiel de la plaine d'inondation du Ludo dans la mesure où ce secteur, en dépit de son statut

de réserve agricole nationale et de réserve naturelle, est l'objet de convoitises économiques menaçant à court terme la sauvegarde de sa biodiversité [GOE 02]. Quatre photographies rendent compte des principales unités de paysages identifiées le long d'un transect réalisé dans ce marais, suivant les résultats de la classification automatique des données spectrales. En second lieu, trois photographies évoquant les manifestations du confinement, de la submersion et de l'érosion sont destinées à attirer l'attention sur ces facteurs majeurs de régression des marais salés. La recherche d'un équilibre esthétique général a conduit à regrouper l'ensemble des illustrations photographiques en bas de la carte.

4. L'apport de la spatio-carte

4.1 *Un apport à l'analyse spatiale des problèmes environnementaux*

La spatio-carte de la Ria Formosa se présente d'abord comme un document de synthèse susceptible d'intéresser un très large public à qui elle offre une source d'information générale lui permettant de prendre conscience de l'enchevêtrement des facteurs susceptibles de modifier l'environnement littoral des marais d'Algarve. Contrairement à la carte d'occupation du sol et à la carte des sols existantes, elle représente un ensemble sélectionné de phénomènes naturels et liés à l'action humaine afin de révéler les contraintes posées par l'environnement des marais.

Par son caractère thématique, cette spatio-carte ne permet pas seulement de connaître la localisation et la nature des phénomènes mais également d'observer, grâce à traitement d'image spécifique et un langage cartographique adapté, les relations existant entre les phénomènes localisés. A ce titre, elle permet d'invoquer deux grands types de contraintes environnementales suivant le caractère "vertical" ou "horizontal" des relations entre les phénomènes.

Le premier procède du caractère hiérarchisé de l'hydrosystème lagunaire et de l'asymétrie des relations entre les différents niveaux hiérarchiques. Ainsi, les processus qui opèrent aux niveaux supérieurs, tels le transfert et la diffusion des nitrates dans les eaux souterraines et les eaux de surface ou les processus de mobilisation et de transfert de sédiments entre la partie externe et interne de la lagune, sont des contraintes pour les processus de succession végétale s'exerçant aux niveaux inférieurs de l'hydrosystème, sans que ceux-ci soient en mesure d'infléchir les dynamiques des niveaux supérieurs. Quand bien même les processus en jeu s'exercent de façon discontinue dans le temps, comme pour les transferts de sédiments rythmés par les variations du rapport fréquence / intensité des événements météo-marins [BER 02], ils traduisent des contraintes de longue durée agissant sur de vastes portions de marais et entraînant des modifications durables de l'environnement.

Le second type de contraintes environnementales procède davantage de la localisation relative des unités de l'hydrosystème et des lieux de déroulement des processus. Il se fonde sur la possibilité physique d'échange entre ces unités. Ces contraintes émanent donc des divers effets d'interface, tel la gradation du confinement hydrochimique en fonction de l'éloignement des passes ou la rétention des flux de matière organique en cas d'abaissement excessif du niveau phéatique consécutif à des prélèvements d'eau (dystrophisation). Le résultat des interactions entre unités se traduit par l'émergence de contraintes nouvelles à un niveau hiérarchique supérieur, telle l'érosion latérale des marais riverains en réponse à la dissipation du surcroît d'énergie tidale introduit dans le système par le dragage des chenaux. Contrairement aux contraintes du premier type, les contraintes liées aux relations "horizontales" entre les unités de l'hydrosystème portent sur des durées plus courtes et des transformations parfois brutales mais cantonnées à des portions d'espace limitées (destruction de la dune bordière, remblayage, recul du rivage).

4.2 Un apport à la prospective environnementale

La spatio-carte ne peut trouver un réel intérêt auprès des gestionnaires de l'environnement que dans la mesure où elle leur offre, au-delà de ces éléments de diagnostic, un outil méthodologique d'évaluation et de prévision des conséquences de changements d'usages et de pratiques, autrement dit une représentation de la vulnérabilité des marais. Une interprétation prospective de la spatio-carte peut reposer de manière relativement simple sur l'analyse croisée des deux types de contraintes intégrant chacun les facteurs du milieu physique et les impacts d'origine anthropique. La définition de la vulnérabilité des marais consisterait ainsi en une évaluation des contraintes environnementales locales (destruction de la dune bordière) à la lumière des contraintes plus générales susceptibles de les surdéterminer (recul du rivage). Pratiquement, cette méthode peut déboucher sur la délimitation d'unités spatiales ayant une signification à la fois géographique et environnementale cohérente car fondées sur des critères de contiguïté et d'interaction forte entre facteurs humains et facteurs physiques.

D'ores et déjà, une présentation en février 2002 de cette spatio-carte, au siège du Parc Naturel de la Ria Formosa à Olhão, a montré que ce type de document cartographique offrait par son caractère intégré une plus value à fois thématique et participative à l'analyse des enjeux environnementaux. Son format d'intégration avec les outils de la cartographie moderne (SIG) doit faciliter son utilisation pour l'établissement d'une carte de vulnérabilité de l'ensemble des marais de la Ria Formosa.

Bibliographie

- [ANO 93] Anonyme, 1993, *Les spatiocartes. Méthodes et exemples de réalisation*. Cahiers Pédagogiques du GDTA, Cahier A1, 103 p. + annexes.
- [BAR] Baron-Yellès N., Bertrand F., Goeldner-Gianella L., Costa S., Arnaud-Fassetta G., Beltrando G., Davidson R. (à paraître), « Enjeux et limites de la gestion environnementale d'un marais lagunaire d'Europe méridionale (Algarve, Portugal) », *L'Espace Géographique*.
- [BER 00] Bertrand F., Arnaud-Fassetta G., Baron-Yellès N., Beltrando G., Costa S., Goeldner-Gianella L., 2000, *Dynamique évolutive et utilisation d'un marais lagunaire d'Europe occidentale*, Dossier de candidature à une Aide à Projet Nouveau, CNRS – SHS, 23p. + annexes.
- [BER 02] Bertrand, F., Costa S., Beltrando G., 2002, 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.
- [GOE 02] Goeldner-Gianella L., Arnaud-Fassetta G., Baron-Yellès N., Bertrand F., Costa S., Davidson R., Beltrando G., (soumis), Les marais endigués de la Ria Formosa (Algarve) face à un siècle de développement économique. Le cas de la réserve naturelle du Ludo, *Annales de Géographie*.
- [JOU 86] Journaux, A., 1986, *Cartographie intégrée de l'environnement : un outil pour la recherche et pour l'aménagement*. Notes techniques du MAB 16, UNESCO, 55 p.

Environnement et facteurs de vulnérabilité des marais du "cul-de-sac" d'Ancão (Ria Formosa, Algarve, Portugal)

Le bas plateau côtier urbanisé

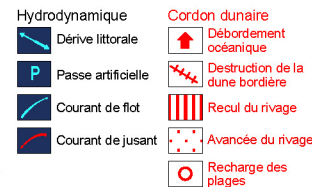


Equipe APN - Jeunes chercheurs
Coordination scientifique et réalisation cartographique : *Frédéric Bertrand (UMR PRODIG)*
Membres de l'équipe : *Gilles Arnaud-Fassetta, Nacima Baron-Yellès, Gérard Beltrando, Lydie Goeldner-Gianella (UMR PRODIG), Stéphane Costa, Robert Davidson (UMR GEOPHEN)*

La zone humide "éclatée"



Aire de renforcement de l'influence marine



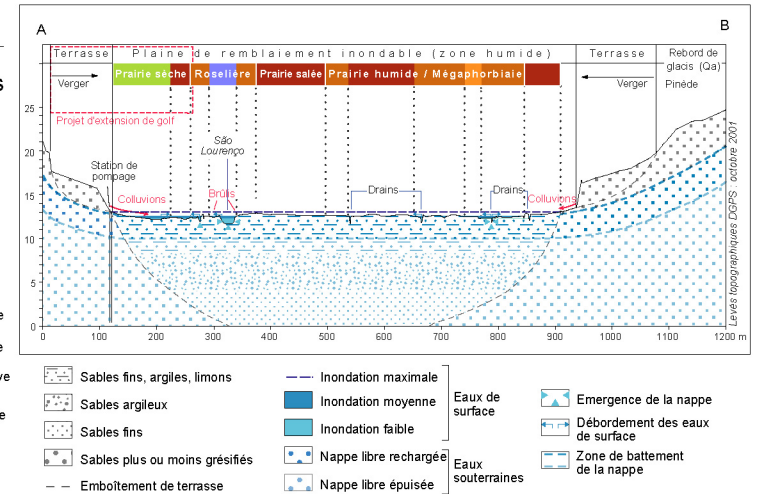
Classification automatique des états de surface des marais



Vue aérienne oblique de la plaine d'inondation du Ludo



Etats de surface de saison sèche et fonctionnement hydrologique des marais saumâtres du Ludo



Composition en couleurs pseudo-naturelles de l'image SPOT XS fusionnée avec le canal panchromatique (résolution 10m).
Coordonnées K, J 026-276
Date d'acquisition : 21/09/1997, 11:23
Niveau de prétraitement 1B
Correction géométrique :
Projection UTM, Gauss-Krüger
Ellipsoïde internationale
Datum Lisboa, Castello São Jorge