



GESTION INTEGREE D'UNE ZONE HUMIDE LITTORALE MEDITERRANEENNE AMENAGEE : CONTRAINTES, LIMITES ET PERSPECTIVES POUR L'ÎLE DE CAMARGUE (GIZCAM)

CONSTRAINTS, LIMITS AND PERSPECTIVES FOR INTEGRATED COASTAL ZONE MANAGEMENT IN THE RHONE RIVER DELTA.

**Programme LITEAU 2
Rapport de fin de contrat**

Tour du Valat
Centre de Recherche pour la
conservation des zones humides
méditerranéennes
Philippe Chauvelon
CR Hydrologie
chauvelon@tourduvalat.org

Date : 14/08/2009

N° de contrat : CV 05000164
Date du contrat : 03/01/2006

RESUMES

En français

RESUME

Le projet a proposé la coordination de plusieurs axes de recherche ayant pour objectif de tendre vers la gestion intégrée de la zone côtière. Il s'agissait de développer un modèle de simulation du fonctionnement hydrologique de l'Ile de Camargue, de le rendre plus modulaire afin de pouvoir intégrer de nouvelles options de gestion hydraulique, particulièrement en conditions critiques (crues et surcotes marines). Cet outil s'appuie en particulier sur des données générées par un Système d'Information Géographique (SIG), qui permet la mise en place d'un tableau de bord de l'état de l'occupation du sol et de l'évolution morphologique des étangs. L'évolution récente du trait de côte et des profils bathymétriques dans les secteurs les plus sensibles, en relation avec les aménagements de protection réalisés et le forçage par la houle, ont été étudiés sur une base quantitative permettant de mettre en évidence l'érosion sous marine devant les digues frontales et l'érosion en aval dérive des épis, sans stabilisation sur 30 ans. Les transferts de pesticides utilisés en riziculture, depuis l'entrée sur le bassin versant ont été modélisés à l'échelle d'une exploitation, et un modèle intégré de transfert dans l'hydrosystème a été développé et testé. Une expérimentation de terrain a été menée, basée sur les flux de radon gaz radioactif naturel, pour quantifier les apports d'eaux souterraines aux étangs. Les flux hydro-salins et de matière en suspension de surface associés aux échanges de surface entre lagune et étangs ont été quantifiés. Une étude a été menée, visant la compréhension des actions, processus décisionnels, de leur impact sur le fonctionnement de la commission exécutive de l'eau de l'Ile de Camargue. La modélisation d'accompagnement, orientée jeu de rôle a été utilisée pour animer la réflexion dans la recherche d'un compromis dans la négociation sur les règles de gestion durable des zones humides littorales.

MOTS CLES GIZC, delta du Rhône, lagune, Camargue, hydrologie, zone humide, riz, changement global, pesticide, géochimie, érosion côtière, modélisation d'accompagnement, multidisciplinaire.

In English

ABSTRACT

The multidisciplinary research project "GIZCAM" coordinated several research axes in order to promote Integrated Coastal Zone Management. A simulation model of the "Ile de Camargue" (Rhône delta central area) hydrological functioning was developed, in particular for hydraulic crisis (river floods and sea storms) situation. This tool is based in particular on data generated by a GIS, whose implementation will lead to a control board of delta land use and coastal lagoon morphology recent evolution. The evolution of coastline and bathymetric profiles in most sensible areas were studied on a quantitative basis in relation with existing coastal defence structures and wave forcing. It was demonstrated that submarine erosion occur in front of frontal dykes, and coastal retreat down-drift of groynes, were no stabilisation occurred in 30 years. Pesticides fluxes were modelled at the scale of rice farm and an integrated hydrosystem pesticide transfer model developed and tested. A field experiment was conducted using radon radioactive natural gas to quantify groundwater flux to the central lagoon. Hydro-saline and suspended material fluxes of sea lagoon surface exchanges were quantified. Empirical study was conducted, focusing on understanding actions, decision making processes, and their impact on the functioning of the water executive commission. A role-playing game based on companion modelling tool, was developed to assess negotiation processes while searching to establish sustainable management rules for coastal wetlands.

KEY WORDS ICZM, Rhône delta, lagoon, Camargue, wetland hydrology, rice, global change, pesticides, geochemistry, coastal erosion, companion modelling, multidisciplinary

RAPPORT SCIENTIFIQUE

GESTION INTEGREE D'UNE ZONE HUMIDE LITTORALE MEDITERRANEENNE AMENAGEE : CONTRAINTES, LIMITES ET PERSPECTIVES POUR L'ILE DE CAMARGUE (GIZCAM)

LITEAU 2

**RESPONSABLE SCIENTIFIQUE DU PROJET :
Philippe Chauvelon, Tour du Valat**

NOMS DES AUTRES PARTENAIRES SCIENTIFIQUES BENEFICIAIRES :

**A. Mayer, O. Radakovitch, F. Sabatier, O. Samat, UMR 6635 CEREGE (Centre
Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement) (Univ.
d'Aix-Marseille 1 et 3)**
**A. Dervieux, A. Allouche, G. Jolly, UMR 6012 ESPACE, Equipe DESMID (CNRS, Univ.
Aix-Marseille 2)**
**S. Chiron, L. Comoretto, P. Höhener, Université de Provence, Laboratoire de Chimie de
l'Environnement**
R. Mathevet, CNRS, CEFE, Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, Montpellier
**P. Gaufres, CETMEF Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales, Aix en
Provence**
Y. Chérain, E. Coulet, Réserve Nationale de Camargue
M. Pichaud, A. Sandoz, Tour du Valat

AVANT PROPOS

Afin de faciliter le transfert de ce projet, nous avons choisi de produire un rapport scientifique sous la forme de fiches thématiques de synthèse, bien que n'étant pas de vulgarisation, le caractère transdisciplinaire du projet impliquait qu'elles soient compréhensibles par un non spécialiste. A priori chacune d'entre elles peut être lue indépendamment des autres bien qu'il existe évidemment des renvois entre elles, au sein d'une même action ou avec celles d'une autre action.

Action 1 : Hydrologie – Hydraulique – Bilans salins et sédimentaires

Personnes impliquées : P. Chauvelon, M. Pichaud (TDV), P. Gaufres (CETMEF)

Fiche thématique 1.1 : Les contraintes hydro-climatiques et hydrauliques pour l'Ile de Camargue P 6

Fiche thématique 1.2 : Modélisation du fonctionnement de l'hydrosystème Vaccarès dans l'Ile de Camargue en situation de crise hydro climatique P 15

Fiche thématique 1.3 : Quantification des flux hydro-salins et sédimentaires dans l'hydrosystème Vaccarès P 23

Action 2 : Analyse de la dynamique spatiale

Personnes impliquées : A. Sandoz, M. Pichaud, P. Chauvelon (TDV), E. Coulet, Y. Chérain (RNC).

Fiche thématique 2.1 : SIG de l'occupation du sol sur le bassin de l'Ile de Camargue P 30

Fiche thématique 2.2 : Topo-bathymétrie du système Vaccarès et morphométrie de la zone des Etangs Inférieurs P 33

Action 3 Volet 1 : Flux et transfert de pesticides

Personnes impliquées : P. Höhener, S. Chiron, L. Comoretto (Université de Provence LCE) ; P. Chauvelon, M. Pichaud (TDV)

Fiche thématique 3.1 : Modélisation des flux de pesticides dans l'Ile de Camargue. P 38

Action 3 Volet 2 : Flux souterrains vers les étangs

Personnes impliquées : O. Radakovitch, A. Mayer, (CEREGE).

Fiche thématique 3.2 : Quantification des apports d'eaux souterraines à l'étang du Vaccarès. P 43

Action 4 : Protection côtière et dynamique littorale

Personnes impliquées : F. Sabatier, O. Samat (CEREGE).

Fiche thématique 4.1 : Erosion du rivage en aval dérive des épis. P 48

Fiche thématique 4.2 : Impact d'une digue frontale sur l'érosion des fonds. Le cas de la digue de Véran. P 52

Fiche thématique 4.3 : Erosion sous-marine devant les Saintes-Maries-de-la-Mer. P 57

Action 5. Volet 1 : La commission exécutive de l'eau et la gestion des ouvrages hydrauliques dans l'Île de Camargue

Personnes impliquées : A. Dervieux, G. Jolly, A. Allouche, (DESMID)

Fiche thématique 5.1.1 : Gestion de l'eau dans l'Île de Camargue et contraintes mer-fleuve-climat : la Commission exécutive de l'eau (CEDE) P 62

Fiche thématique 5.1.2 : Gestion de l'eau dans l'Île de Camargue et contraintes mer-fleuve-climat : de possibles alternatives à la gestion actuelle P 66

Action 5. Volet 2 : Gestion concertée en zone humide littorale: approche par la modélisation d'accompagnement.

Personnes impliquées : R. Mathevet, C. Calvet, CEFE-CNRS

Fiche thématique 5.2.1 : Représentations systémiques individuelles et apprentissages au sein de la Commission Exécutive de l'Eau P 69

Fiche thématique 5.2.2 : CEDESIM : un jeu de territoire autour de la gestion sociale de l'eau. P 76

Fiche thématique 1.1 : Les contraintes hydro-climatiques et hydrauliques pour l'Ile de Camargue

Responsable : Philippe Chauvelon, Tour du Valat

Action 1 : Modélisation du fonctionnement hydrologique et quantification des flux hydro-salins et sédimentaires dans l'Ile de Camargue.

Personnes impliquées : P. Gaufres (CETMEF) ; M. Pichaud, P. Chauvelon, TDV.

Le diagnostic de fonctionnement hydraulique de l'hydrosystème Vaccarès

Dans le Nord et le Sud-Est de l'Ile de Camargue, totalisant 310 km², pour une superficie totale drainée de 422 km², l'eau d'irrigation est pompée dans le fleuve et l'eau de drainage est re-pompée vers le fleuve (ou vers la mer). La partie Est du delta est drainée (fig. 1) vers l'étang du Vaccarès par des canaux à faible pente, le canal du bassin de Fumemorte (FUM) étant le plus important. Dans cette zone « non poldérisée » (87 km²) l'activité agricole est principalement la riziculture par submersion. Un système de digue protège l'Ile de Camargue des crues du fleuve et des tempêtes, le système lagunaire est isolé de la zone des salins par des digues, et connecté à la mer par le Grau de la Fourcade. Le système lagunaire, 105 km² et 101 10⁶ m³ pour une cote du plan d'eau de 0 m NGF, peut être divisé en : l'étang du Vaccarès lui-même, et les « Etangs Inférieurs » eux-mêmes séparés en deux sous unités périodiquement connectées (Etang de l'Impérial (EI) et Etang du Lion (EL), voir figure 1, en fonction des niveaux d'eau. La hauteur de précipitation annuelle moyenne sur les 30 dernières années a été de 620 mm, tandis que l'évaporation moyenne annuelle de l'eau libre est estimée à environ 1400 mm. La circulation des eaux dans les lagunes est surtout induite par le vent, dont la vitesse et la direction (à 10 m du sol) sont mesurées aux stations A (Saintes Maries de la Mer, SMM) et B (Tour du Valat, TDV) (fig.1). Le volume d'irrigation pour le riz, (et donc les volumes de drainage induits) importé essentiellement durant la saison sèche (Mai – Août), (Chauvelon et al, 2001 ; Chauvelon et al, 2003) limite la baisse des niveaux d'eau et l'augmentation de salinité dans les lagunes. Suite à l'occurrence de brèche dans les digues lors de crues majeures du Rhône (Oct. 1993, Jan. 1994), l'Ile de Camargue a été partiellement inondée. L'eau de la zone inondée a été principalement drainée vers le système lagunaire du Vaccarès, puis vers la mer, par gravité ou par pompage (figure 1).

Les échanges entre mer et lagune au Grau de la Fourcade sont contrôlés par 13 vannes coulissantes à ouverture manuelle. A l'automne et en hiver, elles sont généralement ouvertes en nombre par vent de secteur Nord afin d'évacuer l'eau vers la mer pour compenser les apports pluviométriques. Un débitmètre à ultrasons mesure en continu le débit à l'exutoire du bassin de Fumemorte (FUM) (appareil définitivement hors service depuis septembre 2008, non encore remplacé à l'été 2009). Pendant les inondations (1993, 1994) ou en période de délestage par forte pluie (2003, 2005), des jaugeages ont été effectués à l'exutoire temporaire de la zone inondée au nord du Vaccarès (Débouché du canal de Rousty), les débits mesurés à ces occasions varient de 2 à 42 m³/s. Il existe également une possibilité de transfert gravitaire par surverse des eaux du bassin normalement poldérisé vers le bassin de Roquemaure, laquelle a été jusqu'à récemment quasiment toujours utilisée au moins partiellement (1 à 3 vannes de décharge).

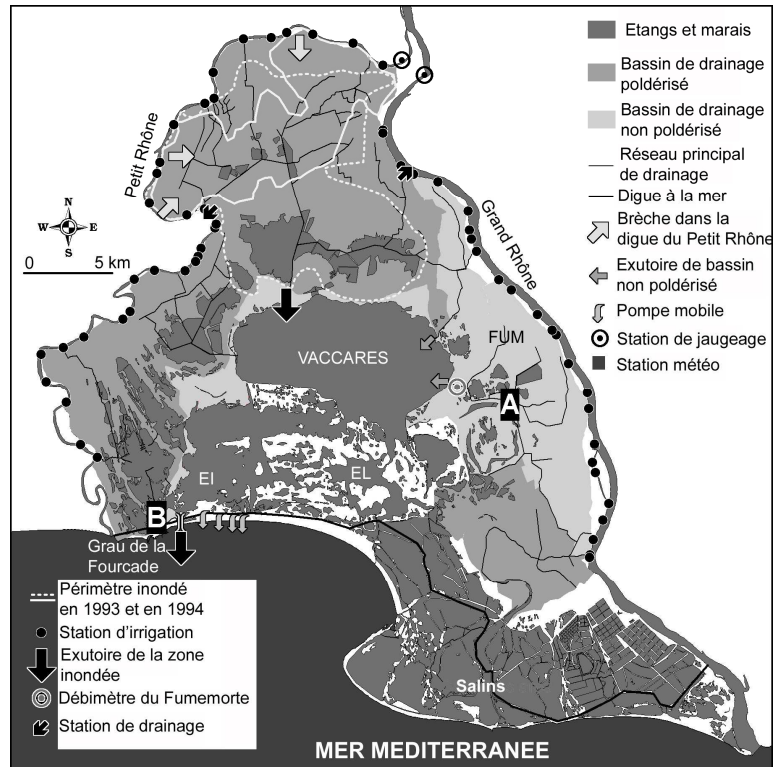


Figure 1 : Carte de l'Ile de Camargue, avec descriptions des situations de crues de 1993 et 1994.

Le débit maximal d'évacuation des stations de drainage est de $26 \text{ m}^3/\text{s}$, à condition que toutes les pompes puissent être opérationnelles, ce qui n'était pas le cas pendant plusieurs jours lors de la crue de décembre 2003. Une pluviométrie journalière supérieure ou égale à 100 mm provoque un débit de pointe en provenance des bassins versant non poldérisés estimé à $18 \text{ m}^3/\text{s}$, (bassins de Fumemorte, Roquemaure, riverains) auquel on peut ajouter, suivant la gestion appliquée, un transfert depuis le bassin normalement poldérisé de 8 à $13 \text{ m}^3/\text{s}$, ainsi qu'un débit supplémentaire éventuel de $1,5$ à $3 \text{ m}^3/\text{s}$ pour le drainage des Saintes Maries de la mer en cas de surcote marine. Dans une situation de transfert d'eau d'une nappe d'inondation depuis le bassin Nord de l'Ile de Camargue, se produisant alors que le delta aurait déjà été soumis à une pluie dépassant 150 mm en 2-3 jours, le débit d'apport instantané aux étangs peut atteindre $60 \text{ m}^3/\text{s}$. Le débit d'évacuation gravitaire par le pertuis des Saintes Maries de la Mer, lui peut dépasser $20 \text{ m}^3/\text{s}$ (figure 2), mais il faut pour cela un fort vent de secteur Nord, ou que l'étang soit déjà rempli à une cote élevée (plus de $0,5 \text{ m NGF}$), avec bien sûr un niveau marin bas.

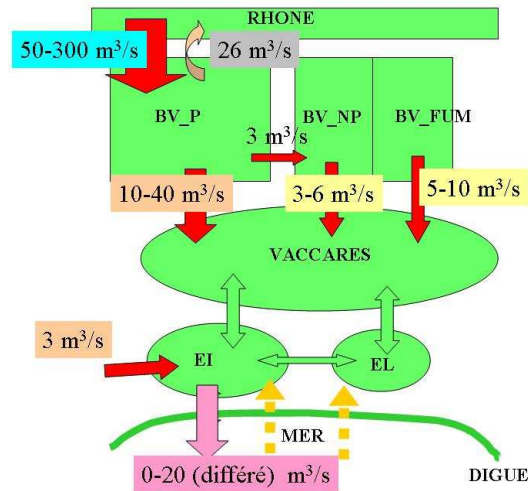


Figure 2 : Représentation schématique de l'hydrosystème en fonctionnement "de crise": brèche sur les digues du Petit Rhône avec pluvial intense. (P, NP : (non) poldérisé ; EI « Etang de l'Impérial » ; EL « Etang du Lion »)

Les contraintes hydro-climatiques

Précipitations et apports du bassin versant

Le caractère très irrégulier du régime pluviométrique méditerranéen rend difficile toute mise en évidence de tendance temporelle et détection de non stationnarité au plan annuel sur les stations Tour du Valat (TDV), Saintes Maries de la Mer (SMM) et Salins de Giraud (SDG) (figure 3. Nous devons cependant noter, si l'on compare les périodes 1963-1990 et 1991-2006, une augmentation de la variabilité (mesurée par le coefficient de variation) des pluies mensuelles de janvier à mars et une certaine diminution de cette variabilité en septembre octobre (figure 4). En comparant les moyennes mensuelles sur ces deux périodes, cela se traduirait plutôt par une diminution des précipitations en fin d'hiver début de printemps sur la période récente, et une augmentation des précipitations de septembre (figure 5).

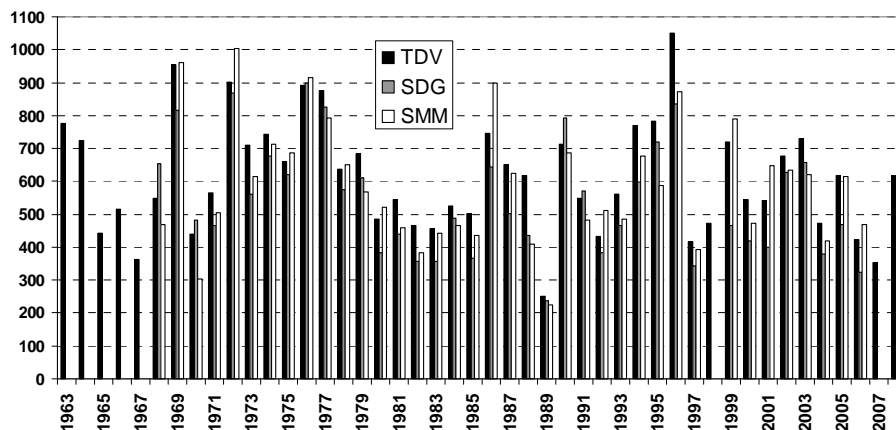


Figure 3 : Précipitations annuelles (mm) des stations TDV (1963-2008), SDG et SMM (1968-2006, valeurs manquantes pour septembre 98).

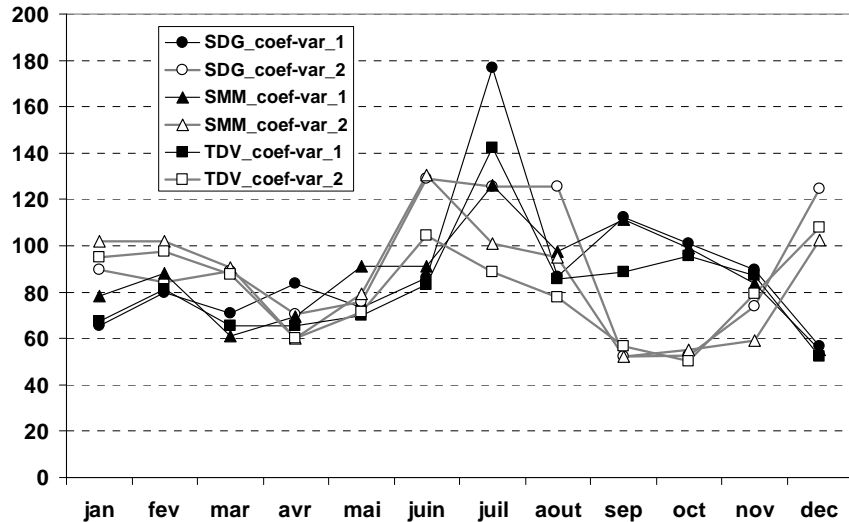


Figure 4 : Comparaison des coefficients de variations de pluies mensuelles (en %) pour les stations TDV, SMM et SDG (période 1 : 1968-1990 ; période 2 : 1991-2006, respectivement 1963 et 2008 pour TDV).

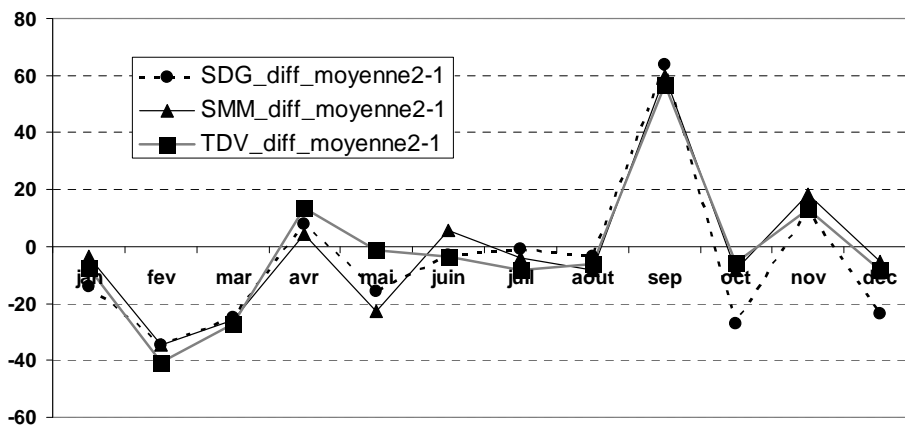


Figure 5 : Comparaison des moyennes de pluies mensuelles (mm) pour les stations TDV, SMM et SDG (période 1 : 1968-1990 ; période 2 : 1991-2006, respectivement 1963 et 2008 pour TDV).

On peut noter que si les hauteurs de pluie annuelles sont plus élevées à la Tour du Valat (620 mm) que sur les stations du littoral (environ 78 mm d'écart avec SDG et 34 avec SDG en moyenne annuelle), les précipitations maximales journalières sont plus fortes sur ces dernières. On retiendra de l'analyse des précipitations extrêmes journalières (Chauvelon et Pichaud, 2007) qu'une précipitation journalière de 100 mm dans le delta a une période de retour décennale soit une probabilité de 10% de se produire chaque année.

L'examen des hydrogrammes du bassin de Fumemorte, jaugé depuis 1993, et pour lequel nous avons les débits correspondant aux événements pluvieux les plus intenses mesurés à la Tour du Valat sur les quarante dernières années ; montrent que l'ouvrage à son exutoire (« barrage anti sel ») semble limiter le débit maximal à environ $10 \text{ m}^3/\text{s}$.

Les crues du Rhône

Nous avons souhaité revisiter et mettre à jour les analyses en termes de valeurs maximales

annuelles (horaires et journalières) pour le débit du Rhône à Beaucaire, car en période de crue forte la cote du Rhône constitue un facteur de risque de brèche et une contrainte de fonctionnement pour les stations de pompage de refoulement au Rhône. La série journalière est disponible depuis 1920 et nous avons obtenu les valeurs maximales horaires auprès de la Compagnie Nationale du Rhône sur la période 1977-2005. Compte tenu des controverses sur le débit maximal de la crue de décembre 2003 et de la conférence de consensus qui a tranché (Collectif, 2005) pour un débit de 11500 m³/s, nous avons, à partir des cotes moyennes horaires, recalculé les débits moyens journaliers pour les crues antérieurement estimées supérieures à 8000 m³/s depuis 1994. Nous avons utilisé pour cela la courbe de tarage proposée par Duband et Bois (2005) qui conduit à des débits estimés moindres pour les fortes valeurs de cote à la station de Beaucaire.

T	1920-05-MV	1920-05-MM	1977-05-MV	1977-05-MM
100	11403	10689	11597	11643
90	11256	10559	11455	11500
80	11092	10414	11295	11340
70	10906	10250	11114	11158
60	10691	10060	10905	10948
50	10436	9835	10658	10699
40	10123	9559	10354	10393
30	9719	9201	9961	9999
20	9146	8695	9404	9438
10	8149	7815	8435	8465
5	7110	6897	7426	7450
3	6283	6166	6622	6642
2	5541	5510	5900	5916

Tableau 1: Ajustement d'une loi de Gumbel (T : période de retour) sur les valeurs maximales annuelles du débit moyen journalier du Rhône (m³/s) à Beaucaire en considérant la série depuis 1920 ou 1977 (aménagements hydroélectriques terminés sur le Rhône) jusqu'à 2005. (MM et MV respectivement ajustement par la méthode des moments ou du maximum de vraisemblance).

Le débit de pointe observé lors de la crue de décembre 2003, ainsi que son débit moyen journalier (environ 10900 m³/s) aurait dans le contexte actuel (analyse de la série des 30 dernières années) une période de retour de l'ordre de 50 à 60 ans (Chauvelon et Pichaud, 2007). Il est important de noter que des crues de fréquence relativement courante conduisent à des situations potentiellement dangereuses pour l'intégrité des digues du delta, en particulier celles du Petit Rhône. En effet pour un débit moyen journalier de l'ordre de 7500 m³/s à Beaucaire (période de retour de 5 ans en débit maximum journalier, sur la série 1977-2005) on atteint, compte tenu de la répartition d'environ 14% du débit vers le Petit Rhône, une cote de la ligne d'eau dans le Petit Rhône à Fourques supérieure à 5 m NGF.

Influence du vent sur la surcote au sud des étangs

Nous avons corrélé les surcotes obtenues au poste Fourcade Nord, c'est-à-dire celui mesurant le niveau en amont de la digue avec le vent moyen horaire. En combinant les observations pour des cotes initiales de 0,1 à 0,35 m NGF, et la vitesse du vent, nous avons ajusté par régression une fonction exponentielle (Chauvelon et Pichaud, 2007). Cette relation pour estimer la surcote ne sera utilisée dans le modèle (cf Fiche 1.2).

Conditions aux limites aval : niveau et salinité dans le chenal maritime de la Fourcade.

D'après les mesures du marégraphe du Grau de la Dent (Salins de Giraud) enregistrées depuis 1905, le niveau de la mer s'élève en moyenne de 2,2 mm/an depuis un siècle en Camargue (Brunel et Sabatier, 2009 (alors que cette élévation est de 1,1 mm/an à Marseille); la différence entre les deux sites étant liée à la subsidence du delta du Rhône résultant de la compaction des sédiments non consolidés du delta. Des analyses récentes (Ullmann et al., 2008) suggèrent que l'augmentation de la fréquence des surcotes marines sur le littoral camarguais est pour une large part responsable de l'élévation du niveau marin moyen. Depuis 2001 des enregistrements (scrutation toutes les 5 minutes, moyenne sur le quart d'heure) sont effectuées aux SMM au grau de la Fourcade. Les mesures doubles (Tour du Valat depuis 2002, et Réserve Nationale de Camargue) permettent d'avoir une série de données sans lacune et relativement fiable (figure 6).

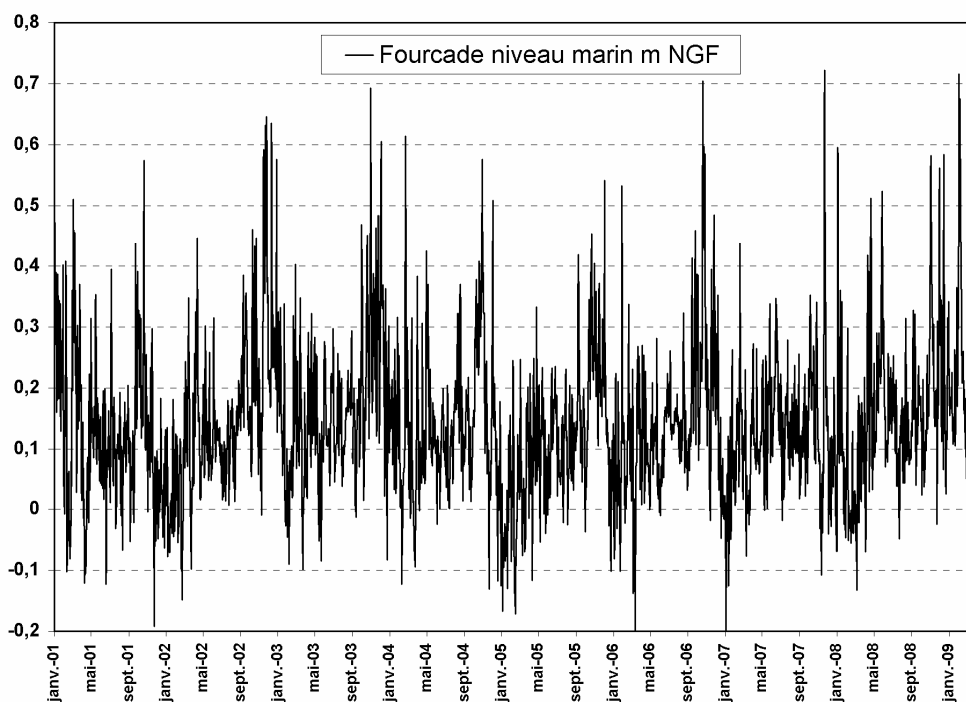


Figure 6 : Niveau marin moyen journalier (m NGF) dans le chenal de la Fourcade de janvier 2001 à mars 2009.

	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	Moy
niv mer m NGF	0,13	0,155	0,166	0,139	0,111	0,141	0,124	0,159	0,141

Tableau 2 : Valeurs moyennes annuelles de la cote en m NGF du niveau marin dans le chenal de la Fourcade (Saintes Maries de la Mer).

Le niveau marin moyen à la Fourcade (tableau 2) sur la période 2001-2008 est de 0,14 m NGF, avec un minimum (0,11 m NGF) pour 2005 (plusieurs périodes de très fort mistral) et un maximum pour 2003 (0,166 m NGF, surcotes marines plus importantes). Il est clair que la cote 0 m NGF, pendant longtemps (et aujourd'hui encore par certains acteurs) considérée comme la référence pour la gestion hydraulique des étangs camarguais n'est plus d'actualité lorsqu'elle est dépassée coté marin en moyenne plus de 80 % du temps (figure 7).

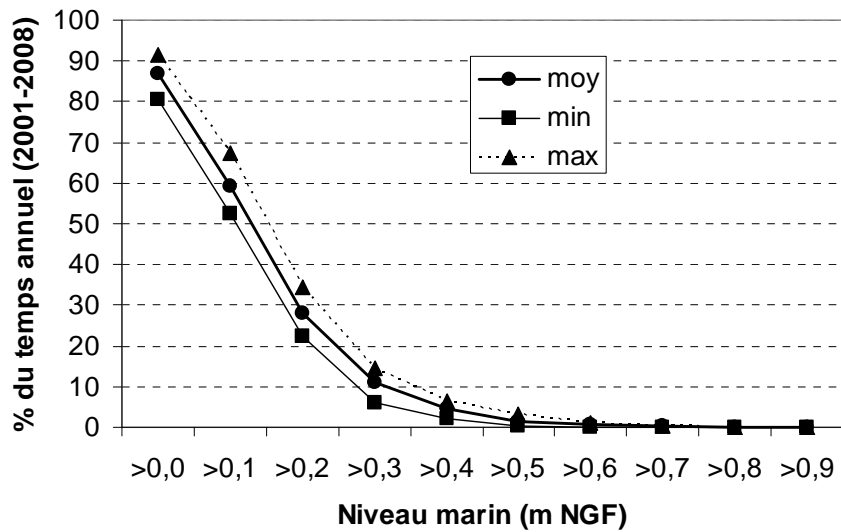


Figure 7 : fréquence de dépassement du niveau marin (calculé à partir des cotes moyennes horaires à la Fourcade) au pas de temps annuel (2001-2008).

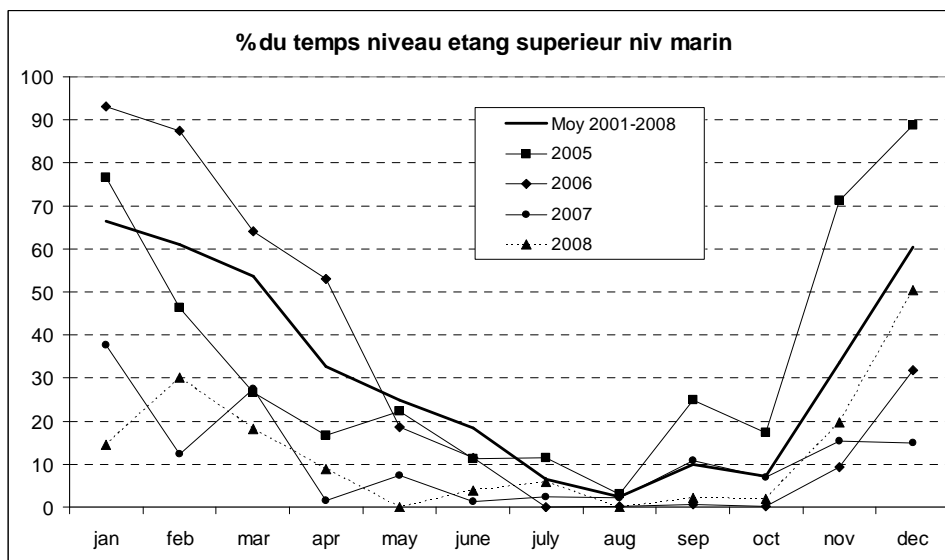


Figure 8 : Evolution du niveau relatif des étangs par rapport au niveau marin au cours des mois de l'année depuis 2005 à la Fourcade.

La figure 8 résume les conditions de différentiel de cote entre les étangs et la mer depuis 2005, année à partir de laquelle (cf fiche 1.3) les flux entre mer et étangs sont dominés par des entrées vers les étangs. Les précipitations relativement faibles sur cette période expliquent des niveaux bas, les apports du drainage agricole variant peu dans le même temps. De fait, en moyenne, et même pour des années pluvieuses (dans ce cas, les évacuations massives effectuées en fin d'hiver et printemps permettent d'abaisser les niveaux avant l'été) la cote des étangs est au moins 90% du temps inférieure au niveau marin de juin à août. Mais le bilan des flux entre mer et étangs résulte évidemment in fine de la gestion appliquée au pertuis (fiche 1.3).

Concernant la gestion hydraulique de ce pertuis se pose le problème de l'interférence avec la gestion de la station de « l'Eolienne », laquelle a été redimensionnée pendant le début des

mesures de conductivité en continu dans le pertuis en 2003. Elle est maintenant équipée de 2 vis d'Archimède de capacité 1,5 m³/s qui refoulent (la plupart du temps une seule fonctionne par intermittence) dans un bassin dont l'exutoire est le chenal maritime de la Fourcade, avec des buses de décharge vers l'Imperial devenant actives à partir d'un niveau marin d'environ 15 cm NGF. Lorsque le niveau marin est élevé, l'exutoire vers le chenal peut être fermé par une vanne et la totalité du débit va vers l'étang. L'eau refoulée par cette station est un mélange d'eau du Petit Rhône, de drainage de marais, de rejets urbains domestique non traités, dont la qualité n'est certainement pas de nature à favoriser celle de l'étang de l'Impérial. Nous nous intéressons ici seulement à l'impact de ce rejet en termes de salinité sur le flux entrant dans l'étang de l'Impérial. Nous avons pu vérifier qu'en dépit du caractère non homogène de la salinité dans le chenal lors du fonctionnement de la station, avec une lentille d'eau plus douce se mélangeant progressivement à l'eau de mer, le mélange de l'eau dans la vanne à la traversée de la digue est suffisant pour que la mesure effectuée par la sonde de conductivité en position fixe soit représentative du flux entrant dans l'étang.

	2003	2004	2005	2006	2007	2008
SAL-entrée g/l	25,1	22,8	nm	24,2	23,2	25,3

Tableau 2 : Valeurs moyennes de la salinité de l'eau entrante (SAL-entrée g/l) dans l'étang de l'Impérial par les vannes du pertuis de la Fourcade.

Les mesures de conductivité en continu (converties en salinité en utilisant la formule de conversion préconisée par la Commission Internationale Océanographique de l'UNESCO) peuvent être affectées au débit calculé. Les mesures par flux entrant depuis 2003 (année 2005 non mesurée suite à vandalisme (perte des données de fin 2004), puis vol complet du dispositif d'enregistrement de la Fourcade début 2005, remplacée seulement en janvier 2006) montrent que l'eau entrant dans l'étang par le pertuis a une salinité moyenne de 24 g/l, au lieu des 35 à 38 g/l de celle de l'eau de mer.

Conclusions pratiques :

La pluviométrie semble devenir encore plus irrégulière qu'elle ne l'était au printemps et au début de l'hiver; des pluies régulièrement abondantes dès le mois de septembre semblent devenir plus fréquentes.

Il ne faut pas négliger le fait d'une possible augmentation de fréquence des crues du Rhône considérées jusqu'à présent comme relativement rares et se prémunir contre un excès de confiance dus aux aménagements des digues réalisés et en cours dans le cadre du Plan Rhône, même avec surverses contrôlées et élargissement localisé du lit majeur par écartement des digues. Ces aménagements ne doivent pas conduire à augmenter d'avantage la vulnérabilité des secteurs protégés : le risque zéro n'existe pas et la protection totale de l'Île de Camargue qui continue de fait à être une « cuvette sous pression » lors des crues et surcotes marines risque fort de ne pas être soutenable sur le long terme (on parle ici de quelques décennies). Surtout en prenant en compte l'élévation du niveau marin et son corollaire de surcotes marines plus fréquentes, lesquelles ont la « fâcheuse tendance » à être souvent concomitante aux événements pluvieux intenses. La protection rapprochée des zones à fort enjeux socio-économique (zones habitées) est moins coûteuse (les digues n'ont pas besoin d'être aussi hautes lorsque l'eau s'étale dans la plaine deltaïque) et plus facile à maintenir sur le long terme (linéaire moins important).

La poldérisation des bassins encore drainés gravitairement vers les étangs améliorera le drainage global de l'Île de Camargue, mais il faudrait d'abord rendre fonctionnels en conditions de crue les stations existantes (voir fiche 1.2) et prévoir de pouvoir supprimer les apports aux étangs pouvant être évacués vers la mer moyennant des aménagements (assainissement des Saintes Maries de la Mer par la station de l'Eolienne directement vers la mer même en cas de surcote marine). Ceci est un préalable évident avant d'envisager des installations de pompage pérennes permettant de vider les étangs : il serait énergétiquement parlant absurde de pomper de l'eau pour l'envoyer dans la lagune et de pomper pour l'en faire sortir à un autre endroit dans le même temps...

Même avec un différentiel de cote en moyenne défavorable à l'évacuation des eaux lagunaires vers la mer en situation « courante », le mistral restera vraisemblablement (cf fiche 1.2) « l'acteur » le plus efficace (hydrauliquement et économiquement) de l'évacuation vers la mer, sous réserve que l'on augmente la capacité hydraulique des pertuis existants. En effet, un vent de secteur Nord de 40 km/h augmente la cote en amont de la digue de 10 cm tout en l'abaissant d'autant coté marin.

Concernant le flux depuis la mer, du fait de la gestion effectuée, l'eau entrante dans le système est moins salée que celle de l'eau de mer (dilution par rejet de la station). Ce qui peut paraître un compromis « intéressant » : on n'augmente pas autant que cela le stock de sel tout en permettant des flux biologiques. Mais compte tenu de son origine, un suivi de la qualité physico-chimique de cette eau devrait être effectué, car il y a un risque non négligeable de contribuer à une eutrophisation excessive de l'étang de l'Impérial, posant des problèmes pour l'écosystème lagunaire, son exploitation halieutique, et de possibles nuisances défavorables à la fréquentation touristique du secteur.

Références bibliographiques :

- Brunel, C., Sabatier, F., 2009. Potential sea-level rise influences in controlling shoreline position for French Mediterranean Coast. *Geomorphology*, vol. 107 (1-2): 79-89.
- Chauvelon, P., Pichaud, M., 2007. Modélisation du fonctionnement de l'hydrosystème Vaccarès dans l'Île de Camargue en situation de crise hydro climatique. Contribution au rapport final IMPLIT Impact des événements extrêmes (tempêtes et surcotes) liés au Changement Climatique sur les hydrosystèmes du littoral méditerranéen français. Programme GICC-2 (Gestion et Impact du Changement Climatique), MEDD, Tour du Valat, mai 2007.
- Collectif, 2005. Conférence de consensus. Débit maximal de la crue du Rhône de décembre 2003 à Beaucaire. Préfet de Bassin du Rhône, Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable, Lyon, 26 au 28 Juillet 2005. Avis du Comité scientifique, Version 2.2, Résumé et conclusions. Rapport 13p.
- Duband, D., Bois, P., 2005. Rapport sur la crue du Rhône et ses affluents du 1 au 5 décembre 2003. Conférence de consensus du 26 au 28 juillet 2005, 40 p.
- Ullmann, A., Pirazzoli, P.A., Moron, V. (2008). — Sea surges around the gulf of Lions and atmospheric conditions, *Global and Planetary Change*, **63** :203-214

Fiche thématique 1.2 : Modélisation du fonctionnement de l'hydrosystème Vaccarès dans l'Ile de Camargue en situation de crise hydro climatique

Responsable : Philippe Chauvelon, Tour du Valat

Action 1 : Modélisation du fonctionnement hydrologique et quantification des flux hydro-salins et sédimentaires dans l'Ile de Camargue.

Personnes impliquées : M. Pichaud, P. Chauvelon, TDV ; P. Gaufres (CETMEF)

Objectifs et stratégie de modélisation

Après une analyse des contraintes de gestion hydraulique de l'Ile de Camargue en conditions hydro-climatiques extrêmes (cf fiche 1.1), il s'agissait de développer un outil simplifié et évolutif de simulation du fonctionnement hydrologique et hydraulique du système lagunaire du Vaccarès pour l'aide à la décision dans la gestion de crue et la prospective. Après calage et validation sur des périodes des automne-hiver (septembre à mars) 2003-2004 et 2005 ; des simulations ont été réalisées avec un modèle conceptuel, en combinant séries réelles observées (vent, pluie, évaporation, niveau marin) (voir figure 1 et 2) et forçage par des hydrogrammes de drainage de la zone inondée du Nord de l'Ile de Camargue (du type de 1993 ou 1994) (Chauvelon et Pichaud, 2007). Le modèle utilisé n'est pas un simulateur de brèches et de propagation de la nappe d'inondation, et nous faisons l'hypothèse de l'intégrité de la digue à la mer. Dans les séries de base utilisées, il y avait une crue du Rhône d'importance suffisante pour provoquer une brèche, et la surcote marine empêchait la vidange des étangs vers la mer. Nous nous mettons dans des situations volontairement très défavorables d'hypothèses de brèches et de transfert d'eau, comme celles observées en octobre - novembre 1993, et telles qu'elles auraient pu se produire dans les épisodes de 1996, 2002 et 2003. Les impacts d'aménagements complémentaires : stations de drainage vers le Rhône sur le bassin versant ; augmentation des capacités d'écoulement gravitaire vers la mer, avec augmentation du niveau marin, ont également été simulés, en utilisant des scénarii basés sur les séries de données des périodes 1996-97, 2002 et 2003 correspondant aux dernières crues importantes du Rhône. Une modélisation hydrodynamique bi dimensionnelle pour le système lagunaire a été développée, mais dans l'attente de données topographiques (Plan Rhône) des zones périphériques et centrales du système lagunaire, les simulations réalisées sont restées limitées à des cotes du plan d'eau inférieures à 0,3 m NGF avec hypothèse de non-débordement (Chauvelon et Pichaud, 2007).

Les séries de base pour les scénarii simulés

Les scénarii s'étendent sur la période du 1^{er} septembre au 31 mars, pour plus de détail, nous renvoyons à la lecture de l'annexe correspondant au rapport final du volet hydrologie du projet IMPLIT (Chauvelon et Pichaud, 2007). Le choix de séries réelles de base (2002-2003, 2003-2004, et 1996-1997) pour les variables de forçage du modèle nous a paru le plus adéquat pour garantir une cohérence hydrométéorologique des valeurs. A titre d'exemple la série de base pour la période 2002-2003 est présentée figure 2. On peut difficilement combiner un vent et un niveau marin avec une pluie ou un débit du Rhône correspondant à un autre épisode. En dehors des hypothèses de gestion et de transfert d'eau d'inondation, les seules modifications que nous avons faites concernent la hauteur de pluie pour un épisode donné. L'épisode pluvieux simulé se produit au même moment que le réel, avec la même durée, mais présente des intensités et cumuls plus forts, modifiant les apports pluviométriques directs et ceux du bassin versant.

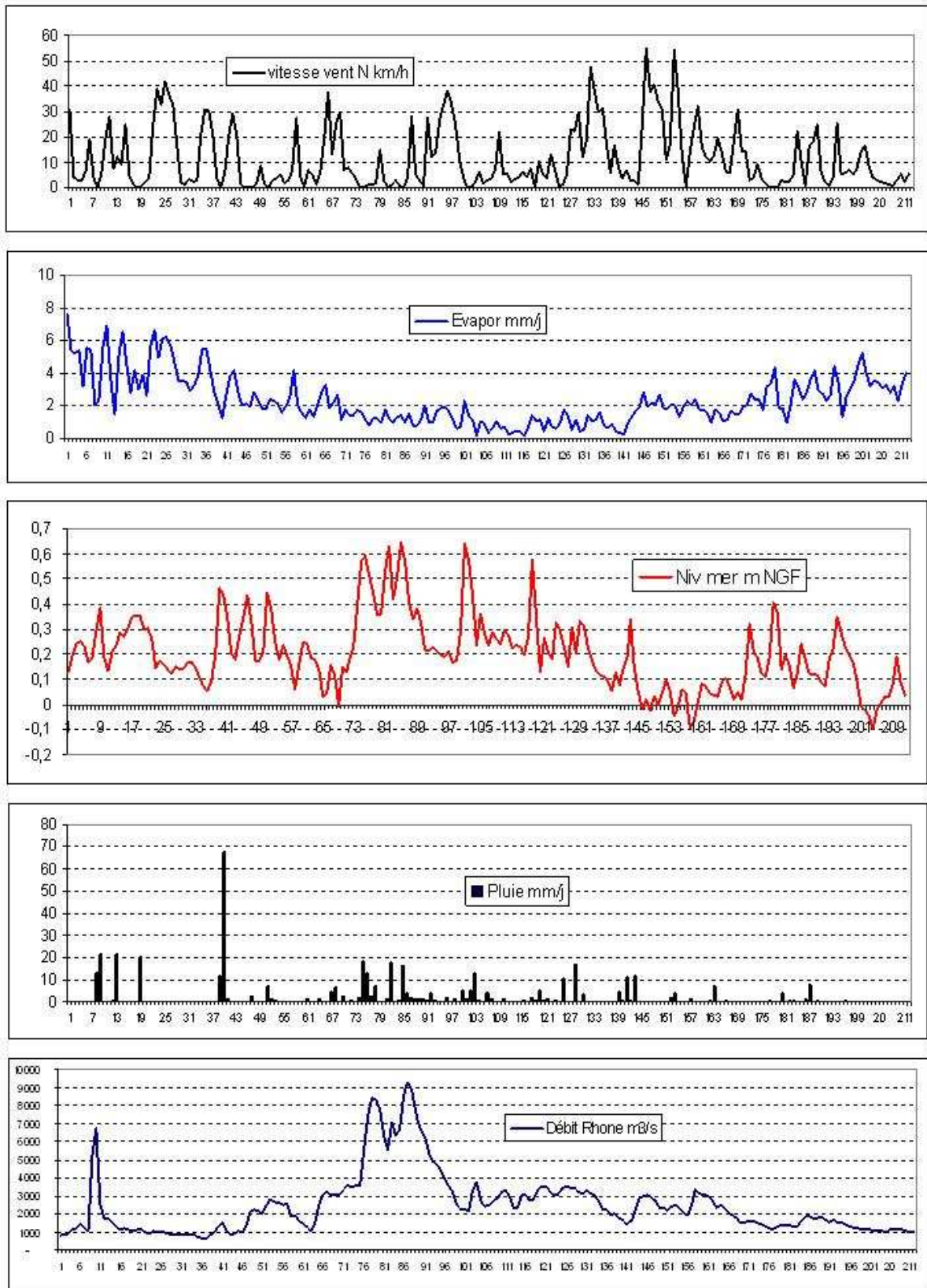


Figure 1 : Séries de données (vent de secteur nord, évaporation, niveau marin, pluie, débit du Rhône) utilisées pour les scénarii basés sur une situation du type septembre 2002 –mars 2003.

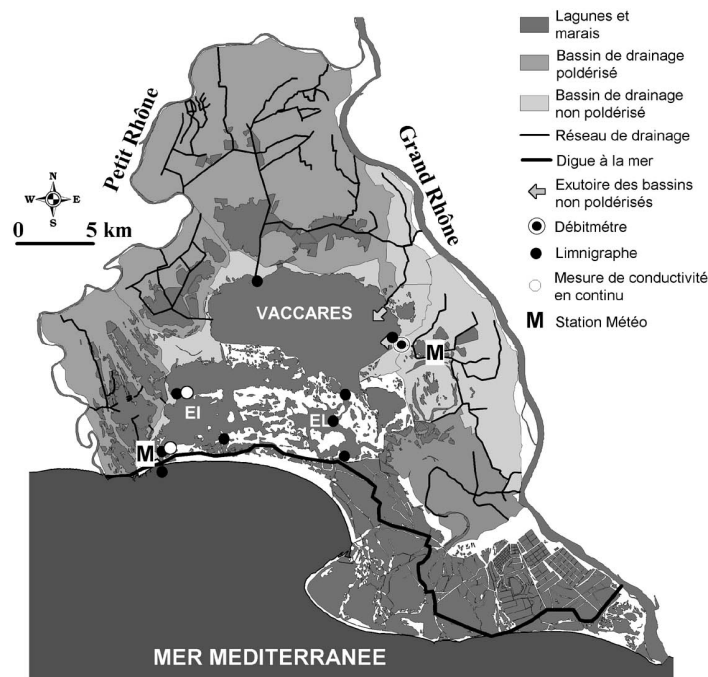


Figure 2 : Réseau de mesures en continu (débitmétrerie, limnimétrie, conductivité) et postes météorologiques principaux dans l'Ile de Camargue.

La structure du modèle conceptuel

Le modèle utilisé pour réaliser les simulations, a été développé avec le logiciel VensimTM, comme celui dont il est inspiré (Chauvelon et al., 2003). VensimTM est un logiciel pour la simulation de la dynamique des systèmes (Rizzo et al., 2006), utilisé comme d'autres systèmes comparables, notamment pour la modélisation hydrologique (Lee, 1993 ; Li et Simonovic, 2002; Hreiche et al., 2002, Hreiche et al., 2006) et les systèmes de gestion des ressources en eau (Argent et Houghton, 2001, Caballero et al., 2004). La modèle utilisé ici est simplifié par rapport à la version précédemment testée pour simuler l'hydrosystème Vaccarès (Chauvelon et al., 2003) ; dans la mesure où il ne prend pas en compte la compartimentation des étangs en sous unités et ne tente pas de simuler la dynamique et la variabilité saline du système (cf Fiche 1.3). L'étang est considéré dans le modèle (figure 3) comme une seule masse d'eau, gérée comme un stock qui va varier en fonction des entrées (bassin versant normal et transferts exceptionnels, précipitations) et sorties (évaporation, sortie vers la mer). En phase de remplissage, en plus de la pluie directe sur le plan d'eau, des hydrogrammes (séries de débit) correspondant à des pluies réelles observées ou de périodes de retour annuelles ou décennales sont introduits en entrée du système comme apport du bassin versant « normal », combinés ou non à des hydrogrammes correspondant au drainage exceptionnel de zones inondées/saturées du Nord de l'Ile de Camargue ; l'effet du vent de secteur sud sur le plan d'eau n'est pas pris en compte, la communication avec la mer est fermée, ce qui est toujours le cas lors des surcotes marines, afin d'éviter les entrées d'eau de mer. Les analyses sont en cours (une assez large gamme de situations de remplissage initial et épisodes de vent de Sud et Est ont été observés depuis l'automne 2008) pour utiliser le même type de méthode sur les décotes générées lors de vent de secteur sud en vue d'utiliser le modèle en toutes situations, notamment pour simuler les entrées d'eau marines, volontaires ou accidentelles.

Dans la version présentée ici, c'est pour la gestion de la vidange du système que nous faisons intervenir le vent. La relation hauteur/volume pour la zone des étangs et leur zone de débordement (cf Fiche 2.2) permet de déterminer le niveau obtenu dans les étangs suite aux apports de crues. A partir de ce niveau horizontal du plan d'eau calculé par le modèle, la vitesse moyenne journalière du vent de secteurs Nord est utilisée pour évaluer la surcote au sud de l'étang, donc pour estimer le niveau de l'étang juste en amont de la digue aux Saintes Maries de la Mer. Dans le modèle, à part pour les opérations de calage et validation sur situations réelles, les vannes du pertuis ne sont ouvertes qu'à partir du moment où le niveau d'eau en amont de la digue est supérieur au niveau marin et sont refermées dans le cas contraire. Les paramètres de calage permettent de moduler les surfaces contributives des zones riveraines non poldérisées, le débit d'entrée/sortie journalier au pertuis maritime. Tous les autres coefficients ou paramètres intervenant dans les calculs étant estimés en amont, avant intégration dans le modèle de simulation.

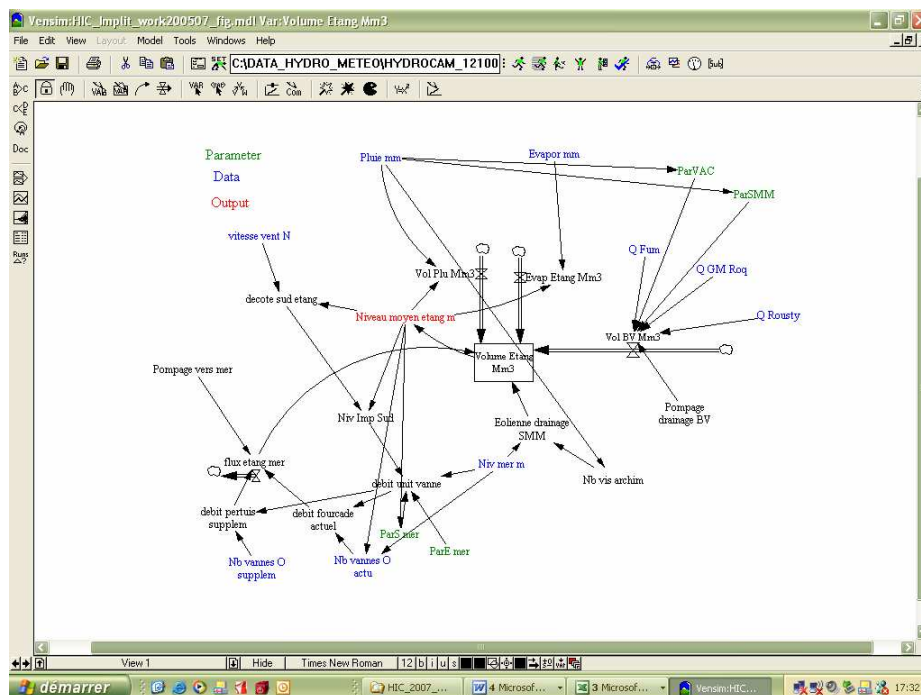


Figure 2 : Outil de simulation de l'hydrosystème Vaccarès développé sous VensimTM.

Résultats des simulations effectuées avec le modèle conceptuel

Calage et validation du modèle

Les périodes utilisées pour le calage et la validation du modèle (figure 3) sont d'une durée d'environ 120 jours. La non connaissance des conditions précises de gestion des ouvrages ne nous a pas permis de le faire sur une période plus longue correspondant à des apports importants. Notons que le niveau mesuré est un niveau calculé à partir des cotes moyennes journalières du Vaccarès Nord et Est (Débouché des canaux de Rousty et Fumemorte) et du Sud de l'Impérial (Fourcade Nord), ce niveau moyen n'est donc qu'une valeur approchée de la réalité du niveau des étangs. Compte tenu du fait que le modèle ne calcule pas les décotes par vent de secteur sud, la différence de niveau entre la mer et Fourcade Nord, et par suite les entrées depuis la mer sont sous estimées. Cependant, ceci ne sera pas un handicap pour la simulation de situations de crise dans lesquelles on fait l'hypothèse d'une ouverture des vannes seulement par conditions de flux potentiel sortant.

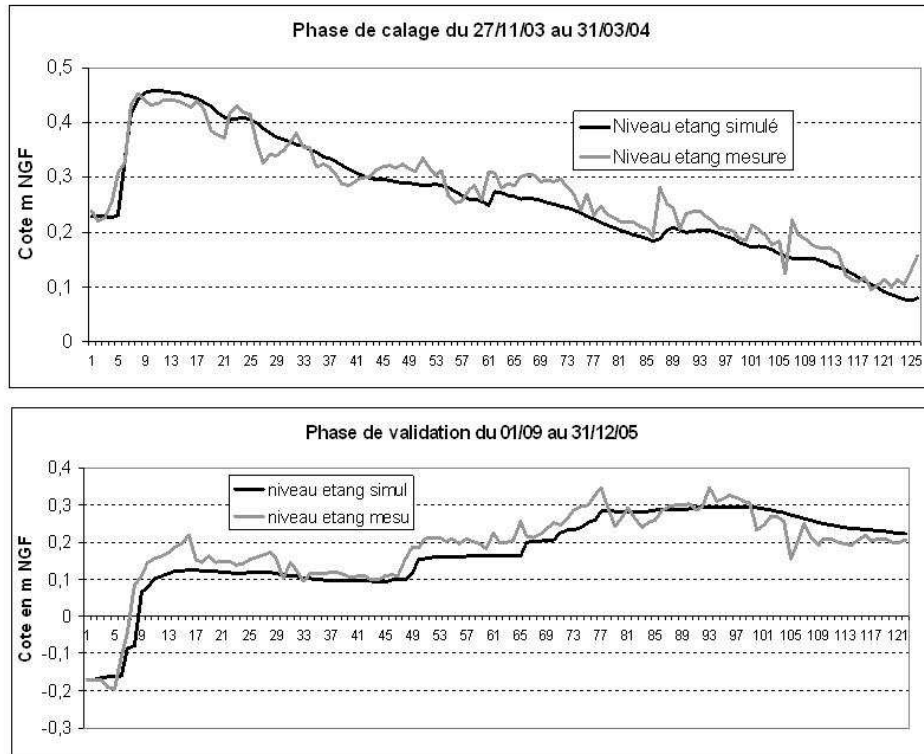


Figure 4 : Comparaison entre valeurs mesurées et simulés (pas de temps journalier) pour le niveau moyen des étangs du système Vaccarès en phase de calage et validation du modèle conceptuel.

Résumé descriptif des scénarios simulés

Dans chacun des scénarii simulés :

- l'option M signifie que le niveau marin réel a été majoré de 10 cm ;
- l'option A signifie que l'on suppose une poldérisation de Fumemorte pouvant soustraire au maximum $10 \text{ m}^3/\text{s}$ d'apports à l'étang, qu'il n'y a pas de surverse du bassin Nord vers Roquemaure et que le pertuis de la Fourcade comporte 10 vannes supplémentaires.

Scénarios du type 2003-2004

Scénario 2003-1 :

- pluviométrie réelle, gestion réelle jusqu'au pic de crue ;
- brèche supposée avec transfert (type 1993, soit 83 Mm^3) depuis bassin Nord à partir du 3/12, surverse de Roquemaure fonctionnant à plein (sauf option A)

Scénario 2003-2 :

- par rapport à 2003-1, pluviométrie majorée en septembre (épisode pluvieux 166 mm, type 18 septembre 1995).

Scénario 2003-3 :

- par rapport à 2003-1, brèche limitée sur Grand Rhone (16 Mm^3) en décembre, transférée par Fumemorte.

Scénarios du type 2002-2003 :

Scénario 2002-2 :

- pluviométrie réelle, brèche avec transfert limité (type 1994, soit 16 Mm^3) du bassin Nord en septembre, brèche et transfert (type 1993, soit 83 Mm^3) en novembre.

Scénario 2002-3 :

- pluviométrie réelle, brèche importante avec transfert majoré (89 Mm^3 , comme en 1993) un épisode pluvieux tendant à épaissir en octobre l'hydrogramme provenant du Bassin Nord, brèche avec transfert limité en novembre (16 Mm^3 , type 1994).

Scénarios « critiques »:*Scénario 2002-max :*

- pluviométrie majorée en septembre (épisode pluvieux 166 mm, type 18 septembre 1995), brèche importante avec transfert majoré (110 Mm³, 1993 « élargi ») un épisode pluvieux tendant à épaissir en octobre l'hydrogramme provenant du Bassin Nord, brèche avec transfert important novembre (83 Mm³, type 1993) de nouveau en novembre.

Scénario 1996-max :

- pluviométrie réelle (la plus importante sur la période de septembre à janvier depuis 1963, avec 582 mm), brèche avec transfert important (83 Mm³, type 1993) au moment de la crue du Rhône en novembre.

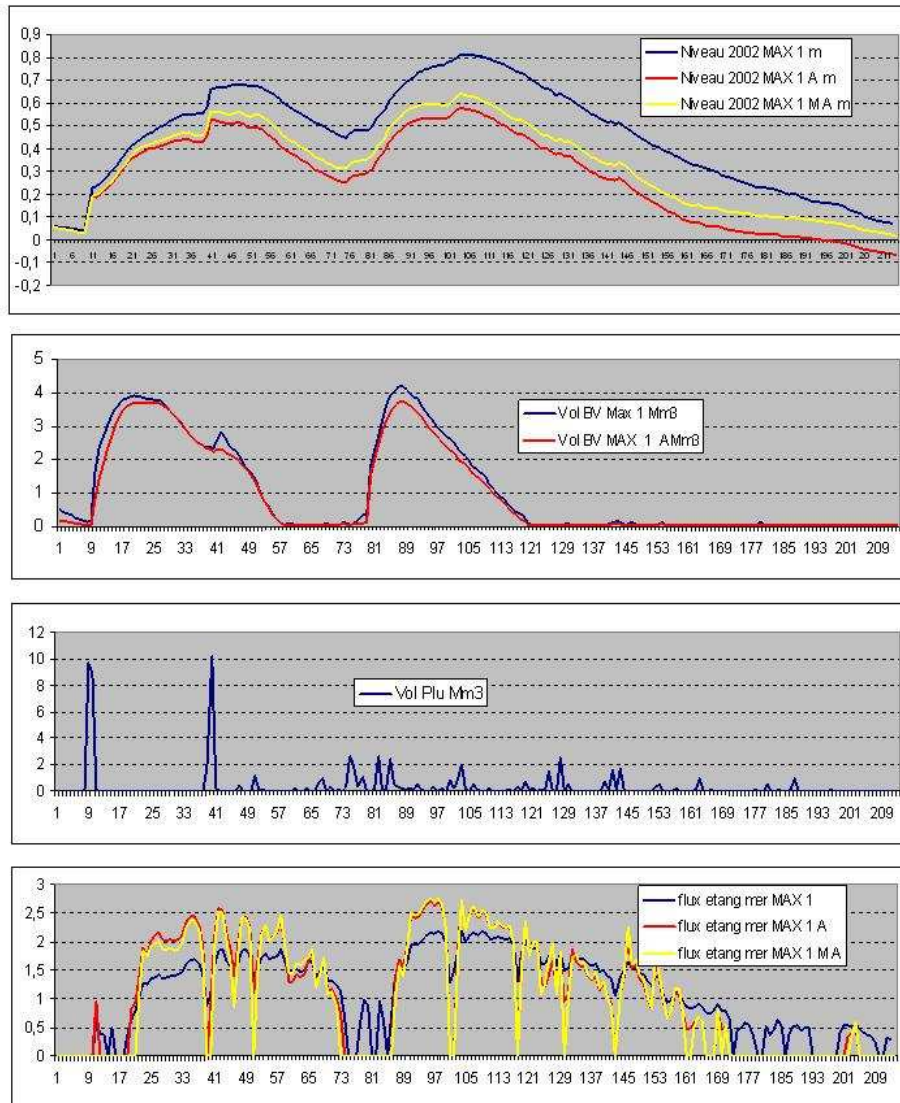


Figure 5 : Résultats des simulations pour la famille de scénarios 2002-max.

- pluviométrie majorée en septembre (épisode pluvieux 166 mm, type 18 septembre 1995), brèche importante avec transfert majoré (110 Mm³, 1993 « élargi ») un épisode pluvieux tendant à épaissir en octobre l'hydrogramme provenant du Bassin Nord, brèche avec transfert important novembre (83 Mm³, type 1993) de nouveau en novembre.

Pour une présentation exhaustive des résultats, se reporter à Chauvelon et Pichaud (2007, 2008), la figure 5 présente le cas le plus défavorable simulé. Les entrées d'eaux maximales

sont d'environ 4 millions de m³ par jour, soit une contribution à la hausse du niveau de l'étang de 4 cm par jour, éventuellement combinée avec une hausse de 10 cm due à la pluie directe sur le plan d'eau.

Les simulations réalisées, correspondant à des situations de crises combinant crues du Rhône (et brèches supposées dans les digues sur le Petit Rhône), surcotes marines et fortes précipitations montrent qu'il est possible d'atteindre dans tous les cas simulés (Chauvelon et Pichaud, 2007) (figure 5) un niveau des étangs « acceptable » à la fin du mois de mars (inférieur à 0,2 voire 0,1 m NGF), même avec un scénario incluant deux crues importantes successives (cas de septembre et novembre 2002) avec ruptures de digue et transfert massif d'eau vers les étangs.

En revanche, le maintien du niveau de l'étang à une cote ne dépassant pas 0,5 m NGF sauf de manière transitoire, suite à des apports massifs, ne peut être obtenu sans modification des règles et capacités de gestion hydraulique actuelles du système.

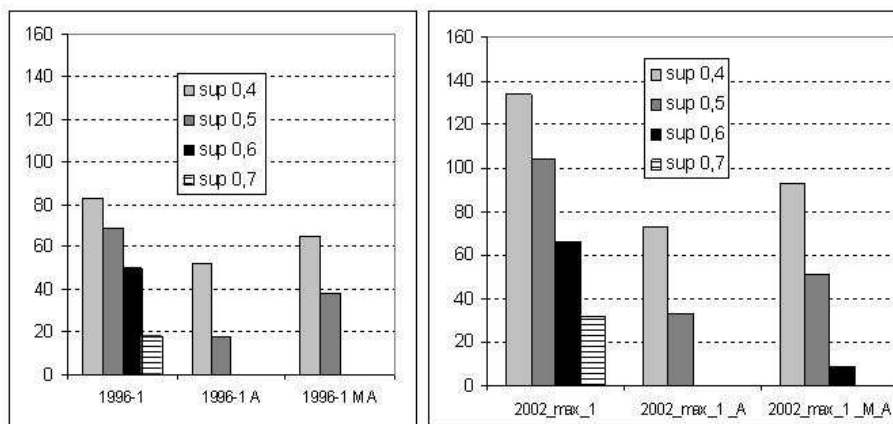


Figure 6 : Nombre de jours de dépassement de différentes cotes de l'étang (en m NGF) pour les scénarii du type 1996 et 2002 max. (Rappel : M pour Niveau marin actuel + 0,1 m ; A : poldérisation et extension pertuis).

Conclusions

S'il apparaît normal que le système lagunaire serve de zone d'expansion pour les eaux d'inondation du delta, il convient toutefois de prévoir de mieux réguler leurs apports et améliorer leur vidange vers la mer. La poldérisation partielle du bassin versant des étangs; la limitation des eaux de transfert du bassin Nord en cas d'inondation à celles transitant par le canal de Rousty (Nord Vaccarès); la possibilité pour les stations de drainage existantes de fonctionner quelle que soit la cote du Rhône ; l'évacuation totale des eaux de drainage des Saintes Maries vers la mer ; ainsi que l'augmentation des capacités d'évacuation gravitaires des étangs vers la mer permettront de limiter les risques de débordement des étangs au-delà de la cote 0,5 m NGF.

Les simulations réalisées dans le cas du scénario le plus défavorable (figure 6) envisagé pour la période du 1^{er} septembre au 31 mars, indiquent qu'avec les conditions de gestion ci-dessus réunies, une station d'assainissement supplémentaire de 10 m³/s sur le bassin versant et dix vannes supplémentaires (de 1,2 x 1 m) au pertuis maritime de la Fourcade; la cote de 0,5 m NGF ne serait plus dépassée que 18 jours (38 avec l'hypothèse d'un niveau marin plus haut de 10 cm) contre 69 dans la situation actuelle.

Références bibliographiques

- Argent, R. M., Houghton, B., 2001. Land and water resources model integration: software engineering and beyond. *Advances in Environmental Research* 5: 351-359.
- Caballero, Y., Chevallier, P., Gallaire, R., and Pillco, R., 2004. Flow modelling in a high mountain valley equipped with hydropower plants: Rio Zongo Valley, Cordillera Real, Bolivia. *Hydrol. Process.* 18, 939–957.
- Chauvelon P., M.G. Tournoud and A. Sandoz, 2003. Integrated hydrological modelling of a managed coastal Mediterranean wetland (Rhône delta, France): initial calibration. *Hydrology and Earth System Sciences*, 7(1), 123-131.
- Chauvelon, P., Pichaud, M., 2007. Modélisation du fonctionnement de l'hydrosystème Vaccarès dans l'Ile de Camargue en situation de crise hydro climatique. Contribution au rapport final IMPLIT Impact des évènements extrêmes (tempêtes et surcotes) liés au Changement Climatique sur les hydrosystèmes du littoral méditerranéen français. Programme GICC-2 (Gestion et Impact du Changement Climatique), MEDD, Tour du Valat, mai 2007.
- Chauvelon, P., Pichaud, M., Sandoz, A., 2008. Simulating hydraulic management of the Rhone delta under flood and sea surge conditions. Presentation at the XIIIth World Water Congress, paper 297, 13p, IWRA, 1-4 Sept 2008, Montpellier, France.
- Hreiche, A., C. Bocquillon, W. Najem, 2006. River Flow Simulation within Ungauged Catchments in Lebanon using a semi-distributed rainfall-runoff model. In: Voinov, A., Jakeman, A., Rizzoli, A. (eds). *Proceedings of the iEMSs Third Biennial Meeting: "Summit on Environmental Modelling and Software"*. International Environmental Modelling and Software Society, Burlington, USA, July 2006.
- Hreiche, A., Mezher, D., Bocquillon, C., Dezetter, A., Servat, E. and Najem, W., 2002. Parallel processing for a better understanding of equifinality in hydrological models. *Proc. Int. Environmental Modelling and Software Society meeting 2002.* 410–415.
- Lee, J., 1993. A formal approach to hydrological model conceptualization. *Hydrol. Sci. Journal*, 38 (5): 391-401.
- Li, L., Simonovic, S. P., 2002. System dynamics model for predicting floods from snowmelt in North American prairie watersheds. *Hydrol. Proc.*, 16:2645-2666.
- Rizzo, D. M., Mouser, P. J., Whitney, D. H., Mark, C. D., Magarey, R. D., Alexey, A. A., 2006. The comparison of four dynamic systems-based software packages: Translation and sensitivity analysis. *Environmental Modelling & Software* 21, 1491-1502.

Fiche thématique 1.3 : Quantification des flux hydro-salins et sédimentaires dans l'hydrosystème Vaccarès

Responsable : Philippe Chauvelon, Tour du Valat

Action 1 : Modélisation du fonctionnement hydrologique et quantification des flux hydro-salins et sédimentaires dans l'Ile de Camargue.

Personnes impliquées : A. Loubet, M. Pichaud, P. Chauvelon, TDV

Introduction

Les difficultés rencontrées sur l'obtention d'une description topographique précise des zones de débordement (en particulier la zone centrale du secteur des Rièges de la RNC), les interruptions de mesures de conductivité en continu dans l'Etang de l'Impérial pendant des périodes prolongées et les conditions particulières de gestion des échanges mer lagune pendant la durée du projet nous ont conduit à réviser nos objectifs en terme de modélisation de la variabilité saline dans le cadre de ce projet. Nous nous sommes attachés en phase préliminaire, à quantifier au mieux les flux hydro-salins en continu à l'interface mer-lagune, à les comparer à l'indicateur stock de sel dans les étangs établi à partir des mesures mensuelles de salinité effectuées par la RNC. En revanche les informations complémentaires acquises sur la riziculture du bassin versant (cf Fiche 2.1) et sur la dynamique des matières en suspension en amont du pertuis de la Fourcade sous l'effet du vent, nous ont permis d'estimer un bilan sédimentaire sur le système Vaccarès pour la dernière décennie (Loubet et al, soumis).

Données utilisées et méthodologie

Le débit du bassin de Fumemorte est mesuré en continu (sauf pannes..) de janvier 1993 à septembre 2008, date à partir de laquelle il a cessé définitivement de fonctionner (démarche en cours depuis pour financer son remplacement..). En dehors des périodes d'apports exceptionnels utilisant des séries de données spécifiques, ou simulées par le modèle (cf Fiche 1.2), on extrapole aux apports totaux du bassin versant par un coefficient de 1.87 (rapport de la superficie totale du bassin non poldérisé à celle de Fumemorte). Une relation entre débit du Fumemorte et concentration en MES (Chauvelon, 1998) est utilisée pour quantifier le débit solide, et une salinité de 0,5 g/l est affecté à l'eau de drainage du bassin versant. Les cotes du plan d'eau sont enregistrées (réseau gérés par la RNC et la TDV) en continu en 2 points du Vaccarès (figure 1), de part et d'autre de la digue au Grau de la Fourcade, les autres stations (2 sur l'Impérial et 2 sur le complexe Lion Dame) fonctionnent sur des périodes plus restreintes, notamment en cas de bas niveaux. Les variations de cote à la Fourcade sont utilisées avec les informations sur les ouvertures de vannes (fournies par les services techniques de la mairie des Saintes Maries de la Mer) pour calculer le débit entrant et sortant au niveau du pertuis (Rosocchi et al., 2003). Sauf fin 2004 et pendant l'année 2005 (vandalisme puis vol d'une partie des installations), la conductivité est mesurée en continu coté étang depuis 2003 à la Fourcade. A partir de mai 2006 une sonde conductivité/température a également été installée sur l'Etang de l'Imperial, laquelle ne peut mesurer des conductivités supérieures à 70 mS/cm, et dont l'acquisition de données a été interrompue à plusieurs reprises pour cause de panne en 2007-2008. Un suivi de la salinité des principaux plans d'eau de la RNC est effectué chaque mois aux alentours du 15. Pour calculer le stock de sel des étangs, nous avons pour chaque date affecté la salinité mesurée au volume calculé (cf Fiche 2.1) par le niveau moyen journalier de la masse d'eau lui correspondant (figure 2). Pour le Vaccarès 4 mesures sont utilisées pour le calcul de la salinité moyenne pondérée (poids de 70% donné à la station « Vaccarès Centre »); 4 points sur le complexe EI (Malagroy, Monro, Imperial); 2 sur le complexe EL (Lion – Dame).

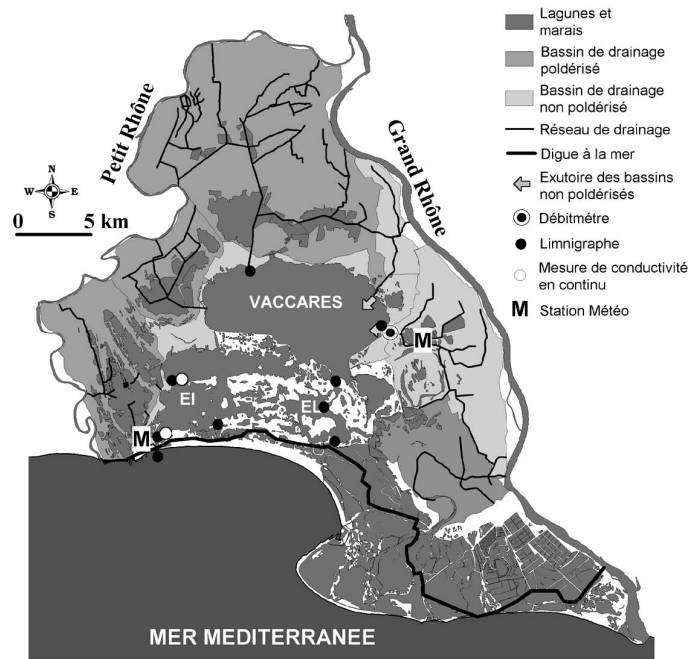


Figure 1 : Réseau de mesures en continu (débitmétrie, limnimétrie, conductivité) et postes météorologiques principaux dans l'île de Camargue.

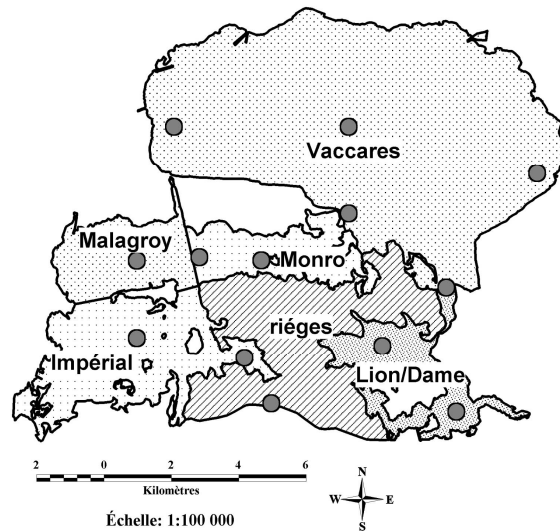


Figure 2 : Délimitation des masses d'eau et points de mesures mensuelles de salinité de la RNC sur les étangs retenus pour le calcul du stock de sel de la masse d'eau.

Pour les périodes sur lesquelles nous disposons d'un jeu de données suffisamment complet, soit de janvier 2003 à octobre 2004 et de janvier 2006 à Septembre 2008 ; nous avons calculé, à partir des mesures en continu (bassin et échanges mer-étang) le bilan des flux hydro-salins sur le système Vaccarès entre chaque date du suivi mensuel afin de le comparer à l'indicateur « Stock de sel des étangs ».

Le taux de MES dans le sud de l'étang de l'Imperial a été corrélé au vent moyen pendant les 3 heures précédant l'échantillonnage (Loubet et al., soumis). Le taux de MES de l'eau entrant depuis la mer a été fixé à 15 mg/l. En combinant débit calculé à la Fourcade et MES calculées à partir du vent aux Saintes Maries de la Mer il nous a été possible d'estimer le flux sortant de MES depuis 1993.

Résultats

Bilan de MES

L'apport de sédiment sous forme de MES dans les différents bassins est tributaire des volumes d'eau introduits en île de Camargue depuis le Rhône pour la riziculture (Chauvelon, 1998 ; Loubet et al., soumis) et de l'occurrence ou non de crues du Rhône pendant la période d'irrigation. L'importance du transfert vers les étangs en temps normal, dépendra lui surtout des crues sur le bassin versant. L'apport annuel de matière en suspension apporté au Vaccarès, hors épisode d'inondations par le Rhône de 1993-1994, varie de 1900 à 4200 tonnes sur la période d'étude.

D'une manière générale, on observe sur l'ensemble de la période 1995-2008 un déficit sédimentaire pour le système lagunaire. On estime en effet une perte nette de 13000 tonnes de MES sur le système des étangs depuis 1995. Toutefois, la prise en compte de l'évènement de crise (+17200 tonnes) des années 93-94 permet de compenser ce déficit sur la période 93-2008.

Bilan des échanges volumiques entre mer et étangs à la Fourcade

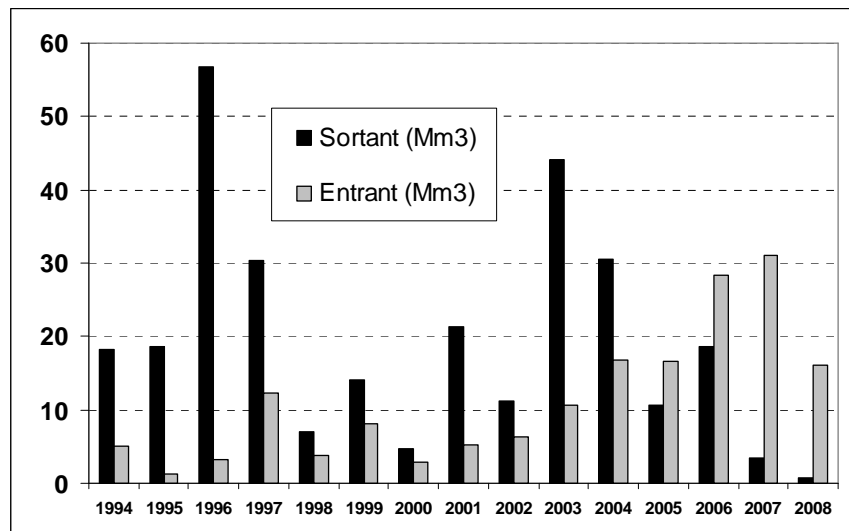


Figure 3 : Bilan des échanges d'eau par les vannes du pertuis de la Fourcade (en millions de m³) de 1994 à 2008.

Après le dessalement important consécutif aux inondations de 93-94 et aux précipitations record de 95-96, un consensus de gestion s'était établi sur la période 97-99 pour rétablir le stock de sel des étangs (descendu à 500 000 tonnes) en augmentant les ouvertures de vannes par flux entrant depuis la mer, processus favorisé par des années peu pluvieuses (97-98) (Rosecchi et al., 2003). Cette gestion s'étant révélée également favorable au plan halieutique ; alors que la règle pendant les années 90 était la fermeture du pertuis de juin à septembre, la gestion des vannes s'est orientée au début des années 2000 vers de plus fréquentes ouvertures

estivales, tout en conservant un objectif pendant l'automne hiver de faire sortir de l'eau dès que la décote avec la mer le permet. Le fait d'une eau entrante plus diluée que l'eau de mer (cf Fiche 1.1) et la diminution du stock de sel lié aux fortes pluies de l'hiver 2003-2004, ne provoquant pas de sur-salures aussi importantes que l'on aurait pu l'attendre en se référant aux périodes antérieures. Par ailleurs, cette situation de flux entrant quasi permanent lors des ouvertures estivales fait que le rejet de la station de l'Eolienne (cf fiche 1.1) ne parvient pas au littoral mais est réintroduit par les vannes dans l'Impérial, limitant ainsi les éventuels effets négatifs sur la qualité sanitaire des eaux de baignade... Suite aux années relativement sèches de 2005, 2006 et 2007, le niveau des étangs inférieurs s'est retrouvé bas de manière durable (cf fiche 1.1) et leur salinité dépassant les 50 g/l à la fin de l'été. Pendant la période de mai à septembre 2008, des professionnels de la pêche sur étangs ont sollicité une gestion alternative de la station de l'éolienne, ainsi la totalité des eaux drainées durant cette période l'a été vers l'étang de l'Imperial, soit un volume estimé à 6 millions de m³, intervenant de manière différente dans le bilan salin du système avec une salinité moyenne de l'ordre de 4 g/l.

Flux et bilan salins sur le Système Vaccarès

L'évolution au pas de temps mensuel, du stock de sel du système calculé par la méthode décrite plus haut est présentée figure 4.

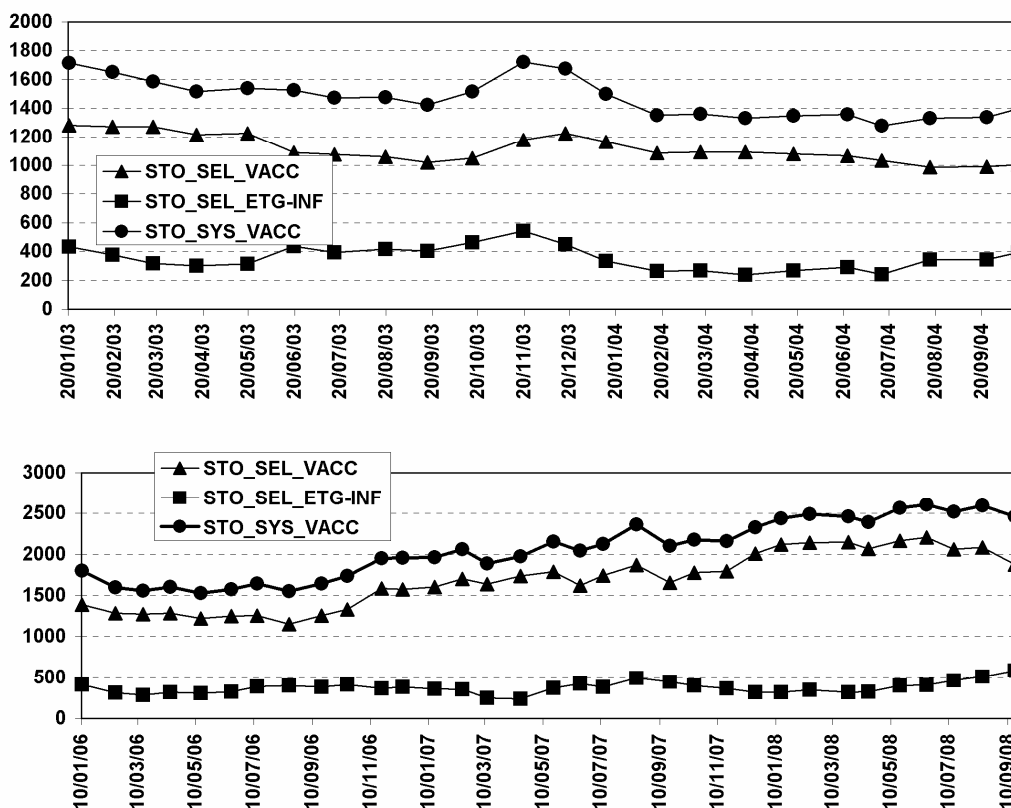


Figure 4 : Valeurs mensuelles du stock de sel (en milliers de tonnes) dans les étangs du système Vaccarès pour les périodes 2003-2004 et 2006-2008.

Les variations de stock et le bilan des flux estimés entre chaque date sur le système Vaccarès sont présentés figure 5 et 6, respectivement pour les périodes 2003-2004 et 2006-2008.

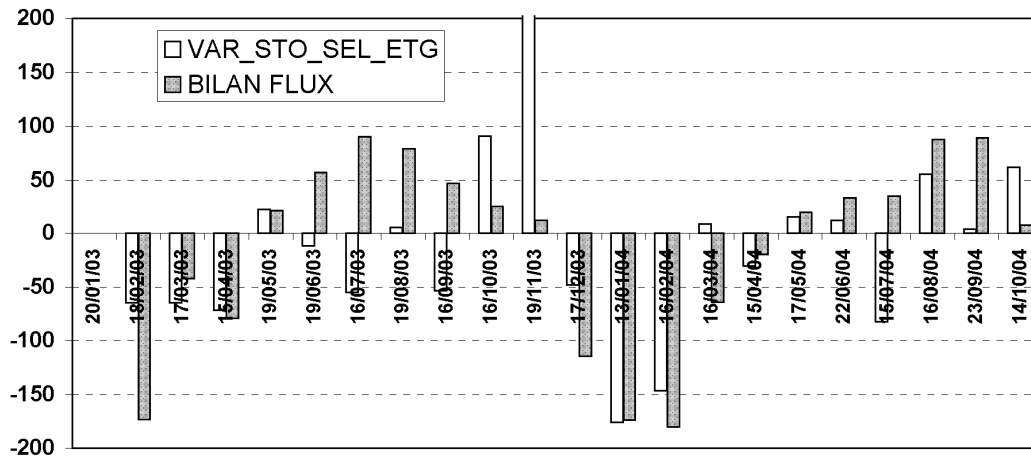


Figure 5 : Comparaison des bilans de masse mensuels de sels (en milliers de tonnes de sel) estimés par variation du stock (VAR_STO_SEL_ETG) dans l'eau des étangs entre 2 dates et par bilan des entrée –sorties (BILAN FLUX) (depuis / vers la mer ; depuis le bassin versant).
Période janvier 2003 – Octobre 2004

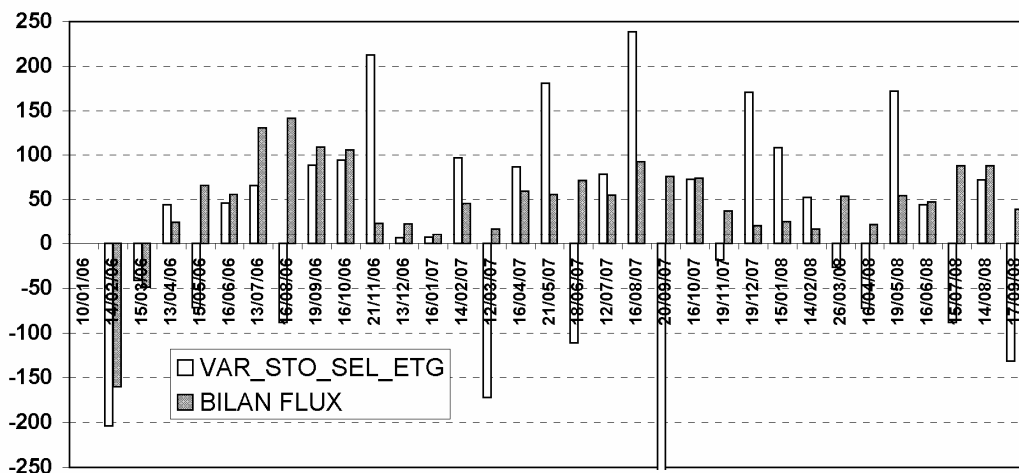


Figure 6 : Comparaison des bilans de masse mensuels de sels (en milliers de tonnes de sel) estimés par variation du stock (VAR_STO_SEL_ETG) dans l'eau des étangs entre 2 dates et par bilan des entrée –sorties (BILAN FLUX) (depuis / vers la mer ; depuis le bassin versant).
Période janvier 2006 – Octobre 2008.

L'examen des résultats montre parfois des différences très significative entre les 2 méthodes, puisque l'on peut avoir sur un intervalle donné des résultats «contraires» : la variation de stock étant négative et le bilan des flux montrant un gain net. D'abord, les valeurs comparées ne représentent pas exactement le même processus. Le bilan est effectué aux limites du système (lagunes + terrains inondables), alors que la variation de stock ne considère que la masse d'eau « étangs ». C'est là qu'il faut chercher en grande partie l'origine des différences observées. Vis-à-vis de la variabilité du stock de sel de la masse d'eau, le secteur central « Rièges » apparaît selon les cas comme une « source » ou un « puits », dont les plans d'eau connexes « gazes » sont en connexion permanente ou pas avec les étangs à partir de -0.2 m NGF. En dehors des chenaux, de nombreux seuils naturels, de cote variables et remodelés au

cours des saisons (dépôts de mélange de zostères et sédiments) provenant des étangs, conditionnent les échanges entre zones de ce secteur central. Leur remplissage se fait de manière assez « impulsionnelle », lors de basculements du plan d'eau par vent de secteur nord et bien sur lors des fortes pluies. La prépondérance et/ou la conjonction des deux processus donnent des effets variés sur l'indicateur «VAR_STO_SEL_ETG» (figures 5 et 6) et permettent d'expliquer les divergences entre ce dernier et le bilan des flux.

Si un basculement important par mistral intervient, permettant le remplissage du secteur initialement « sec », il a pour effet de diminuer la valeur de l'indicateur « stock de sel des étangs ». L'eau et son sel ont quitté les étangs pour inonder les sansouïres et marais du secteur central. Ce qui explique la différence parfois considérable entre variation de stock et bilan des flux comme par exemple entre le 14/02 et le 12/03/07 (figure 7). Mais ce faisant, l'inondation de ces terres permet à du sel stocké dans le sol et en surface (par suite de l'évaporation estivale et des éventuelles remontées salines de la nappe), d'être remobilisé par la masse d'eau. A la cote 0,4 m NGF (cf Fiche 2.2) plus de 10 million de m³ d'eau (figure 8) sont potentiellement stockés sur ce secteur. Si l'inondation et le brassage perdure, l'eau d'inondation rejoindra finalement celles des étangs en exportant du sel, faisant cette fois augmenter l'indicateur stock de sel des étangs, sans pour autant qu'il y ait eu d'apports depuis le bassin versant ou la mer. C'est très probablement ce genre de phénomène qui explique cette fois l'écart entre «VAR_STO_SEL_ETG» et bilan des flux entre octobre et novembre 2003 ou octobre et novembre 2006.

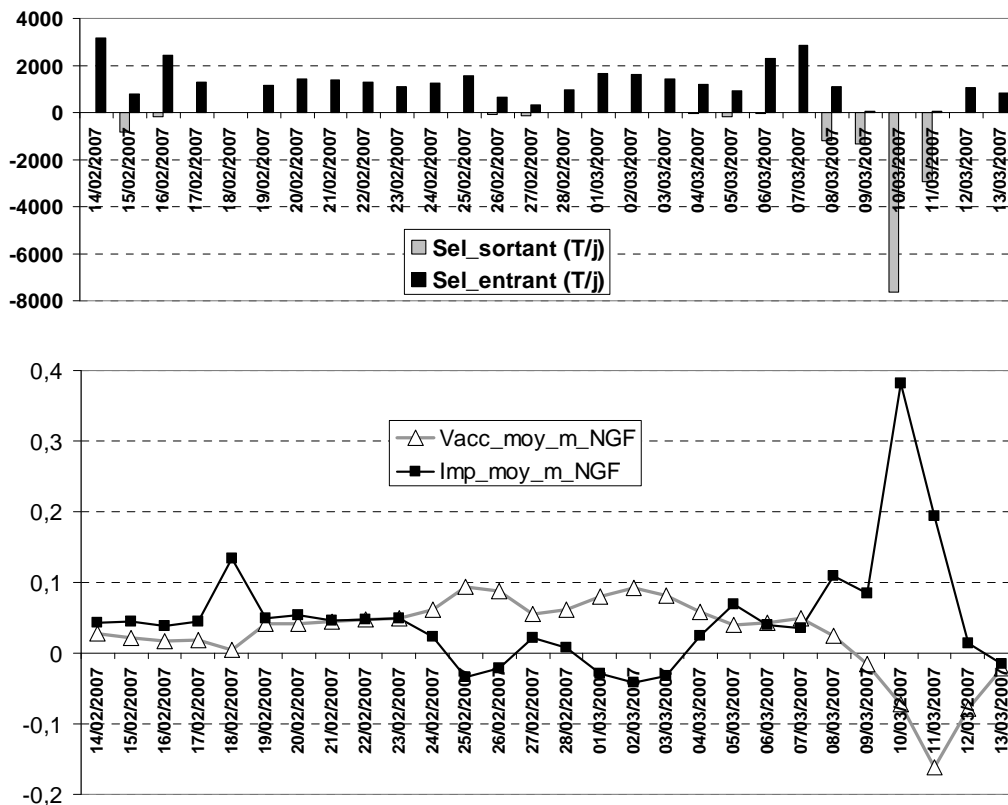


Figure 7 : variation journalières des niveaux moyen du Vaccarès et de l'étang de l'Impérial (m NGF) et des flux de sels à la Fourcade (en tonnes par jour) pour la période du 14/02/07 au 13/03/07.

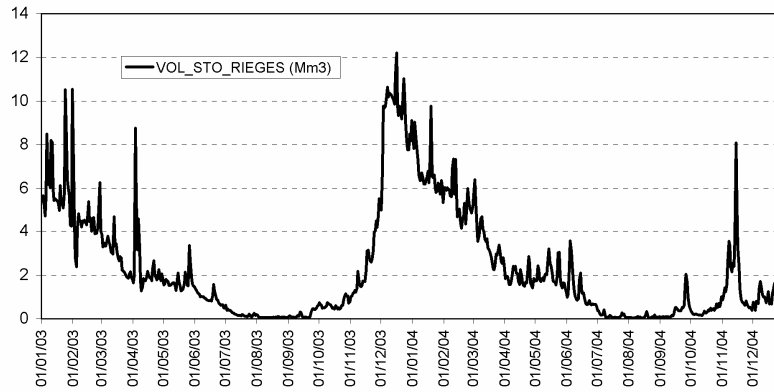


Figure 8 : Estimation du volume d'eau (millions de m^3) pouvant être stocké sur le secteur des Rièges (calculé à partir de la cote moyenne journalière de l'Impérial et de l'étang du Lion/Dame de janvier 2003 à octobre 2004).

Conclusions

Dans un contexte de déficit sédimentaire pour la partie endiguée du delta, la possibilité d'entrées maîtrisées d'eau du fleuve en crue, donc chargée de sédiments, permet d'envisager l'inondation comme un moyen contribuant à compenser le différentiel d'altitude delta-mer dû à la subsidence et l'élévation du niveau marin. Le Plan Rhône se poste exclusivement sur une politique de protection par digues avec surverses exceptionnelles au niveau d'aménagements particulier. Si des ouvrages mobiles ne sont pas prévus dans le cadre de ces aménagements, pour permettre des entrées d'eau gravitaires sur les terres agricoles en période de crues moyennes (ou en période estivale pour diluer l'eau des étangs trop salés), une occasion aura été perdue d'amorcer dès maintenant une gestion adaptative du delta en utilisant des apports hydro-sédimentaires fluviaux « imitant » le fonctionnement naturel avant aménagement.

Un véritable bilan salin pour l'ensemble de la masse d'eau intégrant ses échanges avec les sansouires ne peut se faire qu'après les pluies et le brassage d'hiver-printemps. De ce fait il est délicat de caler un modèle en s'appuyant sur des données mensuelles ponctuelles. Pour modéliser ce bilan salin, outre les lacunes sur la connaissance du flux de sel souterrain au niveau des étangs inférieurs (cf fiche 3.1), des mesures de salinité en continu sur une période suffisante seraient nécessaires dans le complexe Lion Dame et dans un ou plusieurs plans d'eau du secteur des Rièges (à condition que les sondes utilisées puissent mesurer de fortes conductivité). Une description topo-bathymétrique plus fine que celle réalisée à ce jour pour ce « secteur des Rièges » devra être utilisée pour définir des règles de remplissages/vidange de casiers hydrauliques, sur lesquels un modèle de remobilisation du sel devra être spécifiquement calibré.

Références bibliographiques

- Chauvelon P., 1998. A wetland managed for agriculture as an interface between the Rhône river and the Vaccarès lagoon (Camargue, France): transfers of water and nutrients. *Hydrobiologia* 373/374: 181 - 191.
- Rosecchi E., Chauvelon P., Poizat G. et A. J. Crivelli, 2003. Conséquences de la variabilité hydrosaline d'un complexe lagunaire méditerranéen, induite par la gestion hydraulique et les contraintes climatiques, sur ses peuplements piscicoles : le cas du système Vaccarès. Programme National Liteau-98 du M.E.D.D. Rapport final. Tour du Valat, 61 p. + annexes.

Loubet A ; Pichaud M ; Chauvelon P. (soumis) Gestion hydraulique et flux hydro-sédimentaires dans l'île de Camargue. *Revue de la Société Hydrotechnique de France*.

Fiche thématique 2.1 : SIG de l'occupation du sol sur le bassin de l'Ile de Camargue

Responsable : Alain Sandoz, Tour du Valat

Personnes impliquées : A. Sandoz, M. Pichaud, P. Chauvelon, TDV;

Y. Chérain, E. Coulet, SNPN-RNC.

Objectif principal : Réalisation d'un Système d'Information Géographique (SIG) pour la partie occupation du sol agricole.

Le bassin versant

Notre objectif était de développer un SIG permettant l'inventaire, le suivi et l'étude des dynamiques de l'occupation du sol de l'Ile de Camargue.

La base de données crée intègre l'occupation du sol pour les années 1991, 1996 et 2001 de l'inventaire réalisé par le PNRC. La base de données du parcellaire cultural réalisée par le Centre de recherche pour la Conservation des Zones Humides Méditerranéennes de la Tour du Valat sert de base au système d'information pour le suivi agricole.

Réalisation de la base de données

Rappel : La base de données SIG du parcellaire cultural de Camargue a été obtenue à partir des ortho-photographies de l'IGN (BD Carto IGN 2003). Des corrections, notamment géométriques, ont été réalisées pour améliorer le géoréférencement de la base existante et pour la rendre plus en conformité avec d'autres sources (exemple BD Carto de l'IGN).

Les entités parcellaires ont été numérisées sur ces ortho-photographies. Une table attributaire renseigne chaque parcelle sur son occupation du sol pour chaque année renseignée.



Figure 1: Numérisation du parcellaire cultural sur ortho-photographies

Mise à jours de la base de données

La mise à jours se fait par croisement du parcellaire vectoriel et de la classification obtenue par image satellitale.

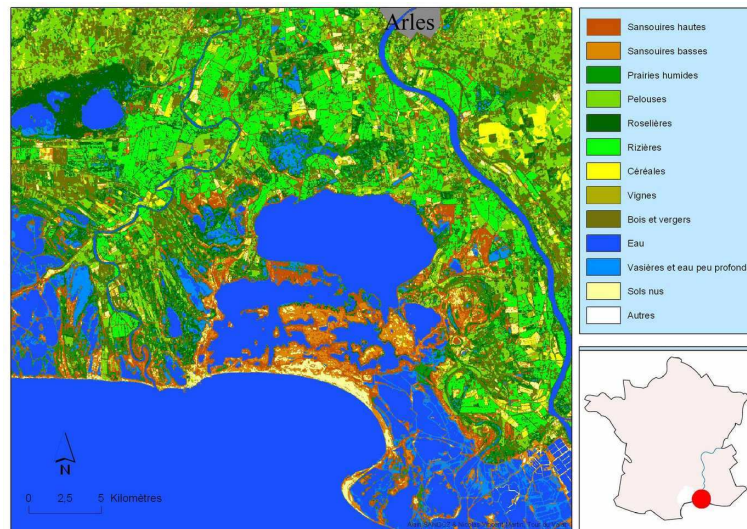


Figure 2 : Exemple de classification de l'occupation du sol pour l'année 2001

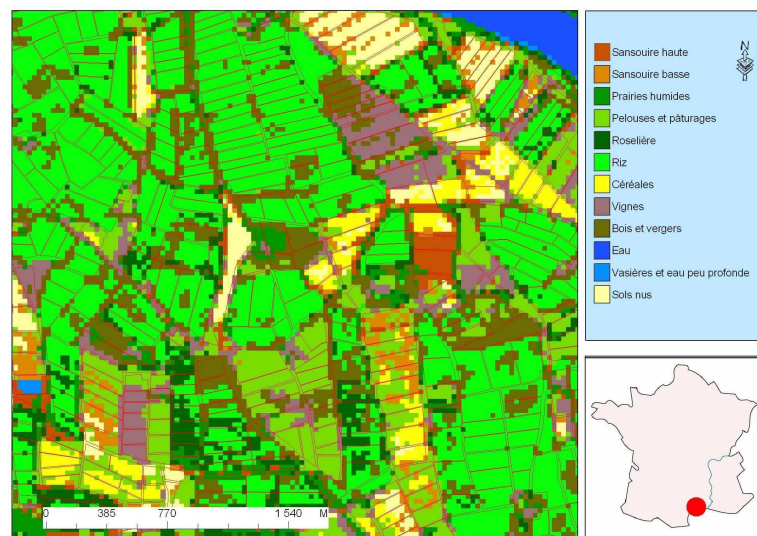


Figure 3: Exemple de croisement de classification de l'occupation du sol pour l'année 2001 avec le parcellaire cultural sous SIG

Une mise à jours a été réalisée pour chaque année depuis 2002 en complément des années 1991, 1996 et 2001 pour la riziculture qui conditionne l'essentiel des volumes d'eau pompés dans le Rhône. La mise à jour a été réalisée par l'utilisation d'images satellitales classifiées. Ces images classifiées et intégrées dans le système d'information géographique ont permis de renseigner les différentes entités vectorielles (parcelles agricoles, habitats naturels...). L'information concernant le suivi agricole est renseignée au niveau de la parcelle culturale.

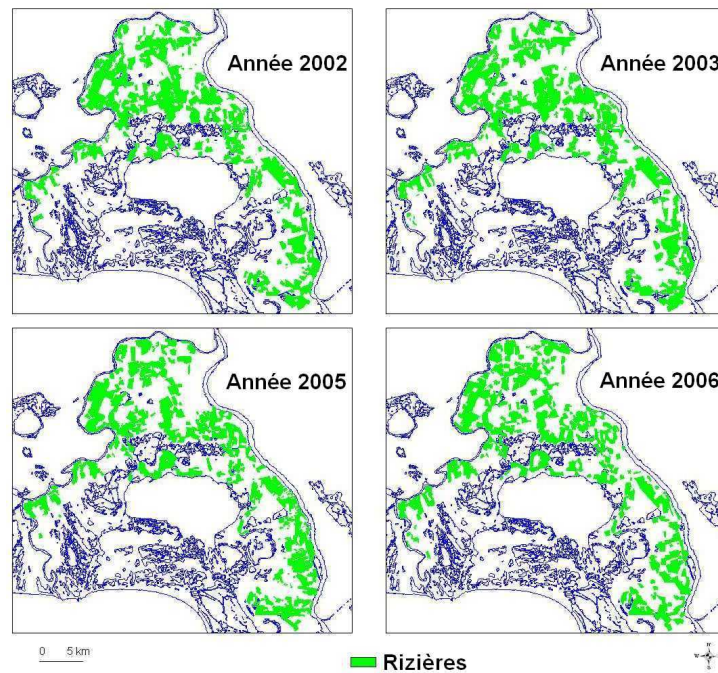


Figure 4 : Exemples de cartes de la riziculture dans l'Ile de Camargue

Années	Superficies en ha
2001	10957
2002	9140
2003	9108
2004	8855
2005	8665
2006	8884
2007	8347

Tableau de l'évolution des superficies en riz dans l'Ile de Camargue entre 2001 et 2007

Applications pratiques

Une méthode a été développée lors de travaux antérieurs (Chauvelon et al, 2001, Chauvelon et al, 2003) pour permettre de calculer les volumes d'eau utilisés par la riziculture en fonction des superficies cultivées par bassins d'irrigation. La mise à jour du SIG pour le thème de la riziculture a permis d'effectuer les requêtes et calculs nécessaires pour actualiser la quantification des flux d'eau annuels entrant dans le bassin versant du Vaccarès (fiche 1.3).

Une version du SIG utilisable par le biais d'un site internet sera opérationnelle au début de l'automne 2009. Les données spatialisées seront visualisables et téléchargeables (format HTML) sous forme de carte, avec des requêtes possibles (par bassin de drainage par exemple). Ces données seront également fournies au PNRC et à la RNC.

Fiche thématique 2.2 Topo-bathymétrie du système Vaccarès et morphométrie de la zone des Etangs Inférieurs

Responsable : A Sandoz TDV

Personnes impliquées : A. Sandoz, M. Pichaud, P. Chauvelon, (stagiaires E. Mannessiez, S. Leclerc) TDV; Y. Chérain, E. Coulet, SNPN-RNC.

Objectif principal : Réalisation d'un Système d'Information Géographique (SIG) sur le secteur endigué de transition (vers le milieu marin) des lagunes permettant une analyse des conditions de submersion et de son évolution morphologique récente.

Morphométrie des rivages des Etangs Inférieurs

Des mosaïques d'orthophotographies géoréférencées des années 1953, 1977 et 2003 ont été réalisées et utilisées pour digitaliser les contours des étangs. Les couvertures aériennes étant réalisées en avril ou mai, le niveau de l'étang du Vaccarès pour chaque période se trouvait dans la gamme de 0.1 à 0.2 m NGF). D'un point de vue méthodologique, la délimitation des contours (rivages, limites de végétation...) s'est trouvée confrontée à des problèmes de choix dans les points de calage. Les points invariants au cours du temps sur lesquels il est possible de « s'appuyer » pour effectuer les mosaïques d'images ortho-rectifiées sont rares dans ce secteur.

La quantification surfacique de l'évolution sur les cinquante dernières années montre l'existence de processus morpho-sédimentaires dans le secteur des Etangs Inférieurs relativement important. Ces phénomènes morpho-sédimentaires interviennent dans la capacité de résilience (ou non) de l'interface lagunaire face à la montée du niveau marin et la probable intensification des phénomènes météorologiques (érosion des berges et îlots sous l'effet du vent, transfert de sédiments).

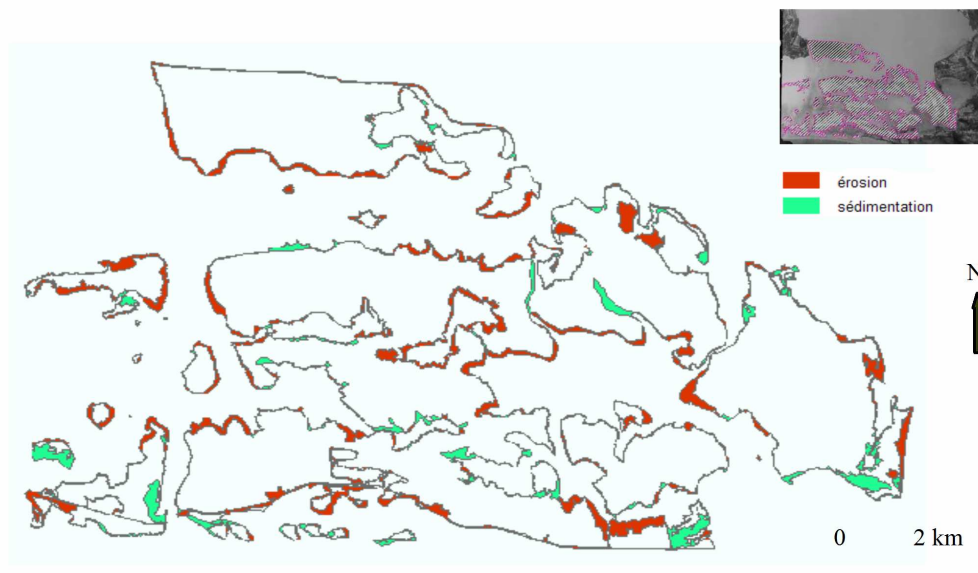


Figure 1 : Evolution morphologique des rivages des Etangs Inférieurs entre 1953 et 2003

Les résultats montrent qu'il y a eu une diminution de la superficie totale des îlots d'environ 6% depuis 1953. L'érosion des îlots a principalement eu lieu entre 1953 et 1977.

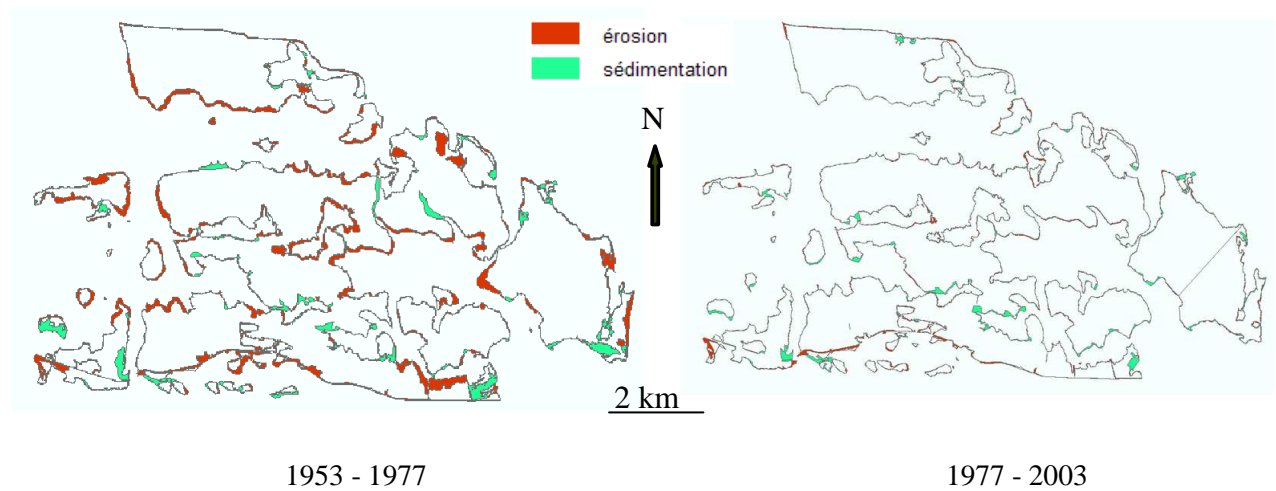


Figure 2: Evolution morphologique des rivages et îlots des Etangs Inférieurs entre 1953 et 1977 et entre 1977 et 2003.

La modification de la morphologie des passes, le comblement des étangs dans certains secteurs, les zones de sédimentations nouvelles..., ont un effet sur le fonctionnement hydrodynamique du système d'étangs, et, par la suite, sur la dynamique saline et donc ses conséquences sur l'écosystème aquatique, son exploitation et sa pérennité.

Cette connaissance permet, notamment pour les gestionnaires, d'envisager des scénarii prospectifs de gestion intégrant les dynamiques morphologiques. Il sera intéressant de compléter cette analyse comparative par réalisation de la cartographie pour l'année 1998 (BD Ortho IGN). En effet elle permettrait peut être de voir les effets éventuels des entrées sédimentaires dues aux inondations de 1993-1994 et ceux des hauts niveaux des étangs pendant plusieurs hivers consécutifs. Donnant une image intermédiaire de la situation avant 2003.

Topo-bathymétrie du Système

En l'absence d'une couverture de type LIDAR (altimétrie laser aéroportée), combinée avec photogrammétrie, non encore disponible via le Plan Rhône pour l'Ile de Camargue, les relevés topographiques réalisés sur le terrain s'avèrent insuffisants pour extrapoler spatialement l'inondation des Etangs Inférieurs et du système Vaccarès. Etant donné la complexité morphologique et les variations micro-altimétriques du secteur central, entre les Rièges et la digue, ces données restent donc insuffisantes malgré l'effort louable de la RNC car leur densité, en terme de couverture spatiale, ne permet pas une extrapolation « objective » sur tout le secteur des terrains du sud de la RNC. Ces données seront cependant extrêmement pertinentes pour corriger et recalibrer les éventuelles données du MNT Plan Rhône.

Par ailleurs, pour compléter les données de terrain, des données additionnelles ont été générées à l'aide d'images satellitales. Par temps calme et cote du plan connue, il est possible de délimiter des points d'iso-altitude à partir du contour du plan d'eau.

Les données topo-bathymétriques déjà compilées ont permis de générer un MNT utilisable pour calculer superficies et cubatures en vue de créer de nouvelles relations niveau/superficie et niveau /volume utilisable pour le système d'étang considéré comme un seul réservoir d'eau. La compartimentation en plan d'eau différents (utile pour calculer ensuite localement des volumes auxquels sont associés des salinités (voir fiche 1.3) reste subjective et implique des arrondis dans le calcul des MNT qui font que la somme du volume des éléments diffère légèrement du volume de l'ensemble.

Les images utilisées pour compléter les données bathymétriques nécessaires à l'analyse du fonctionnement du système Vaccarès et des Etangs Inférieurs proviennent des satellites Spot 5, obtenues par le biais d'un projet ISIS, et Landsat 7 TM.

Traitement et analyse des données

Le traitement de l'image brute a été effectué avec le logiciel Géoimage, le traitement de l'information avec Arcgis et enfin les données sont compilées et complétées avec l'aide du logiciel Mapinfo.

Des images Landsat (résolution spatiale de 30m) et Spot (10m) ont été sélectionnées pour des dates où les hauteurs du plan d'eau étaient différentes (environ tous les 10 cm) et pour lesquelles la vitesse du vent était inférieure à 5m/s. Cette condition, de vent faible, permet de minimiser l'effet du basculement du plan d'eau. L'identification de l'eau se base sur le profil spectral tout à fait spécifique dans le canal moyen infrarouge (MIR) caractérisé par des réflectances faibles car l'eau absorbe fortement les rayonnements dans cette longueur d'onde. On peut ainsi aisément discriminer les surfaces en eau, qui apparaissent sur l'image avec de faibles valeurs numériques.

Une série de classifications supervisées sous Géoimage a donc été réalisée pour discriminer les zones en eau et non eau à différentes dates pour différents niveaux.

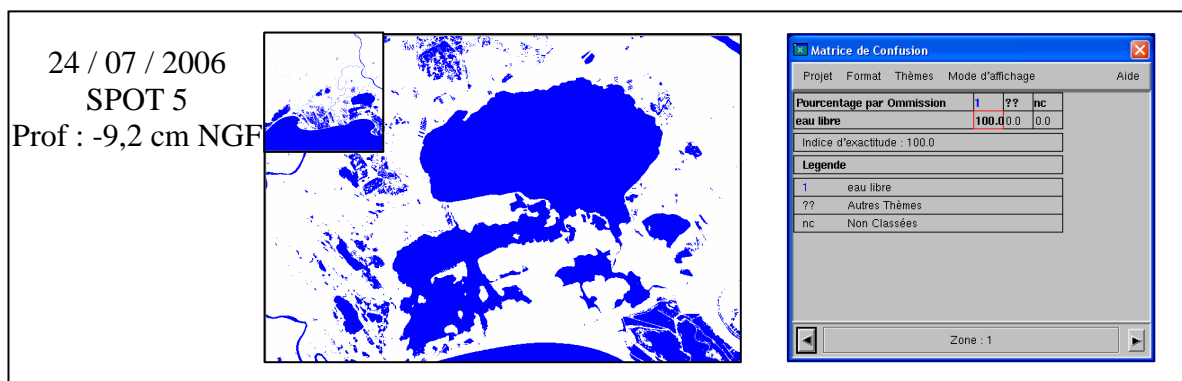


Figure 3 : Exemple de classification eau (en bleu) – non-eau (en blanc)

Les résultats des traitements numériques sont corrigés géométriquement par rapport au scan 25 IGN de la Camargue sous Arcgis (système de coordonnées : Lambert II étendu).

Le modèle numérique d'altitude (MNA) offre une représentation numérique du relief d'un territoire généré à partir de données altimétriques. Ce modèle, intégré à un système d'information géographique, permet la mise en place de multiples fonctions d'analyse spatiale.

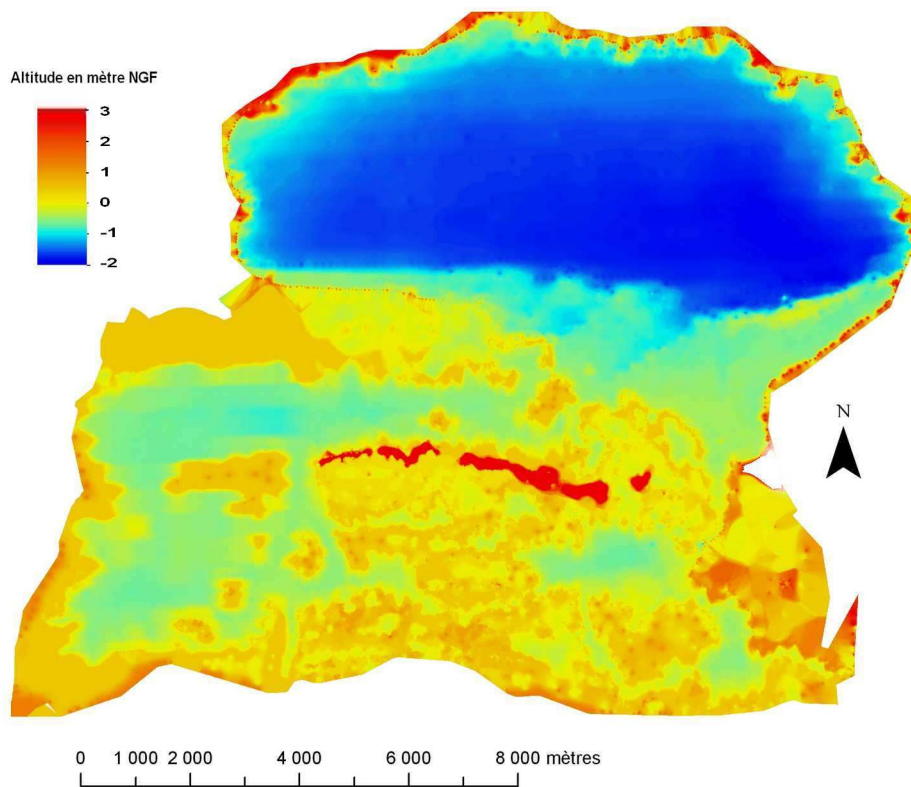


Figure 4 : Modèle Numérique de Terrain en mètres NGF du système d'étangs du Vaccarès.

Le MNA (figure 4) est obtenu grâce à un TIN (Triangular Irregular Network) qui consiste à créer un réseau de triangles irréguliers en reliant entre eux des points dont l'altitude est connue. Ensuite, l'interpolation de nouvelles valeurs d'altitude entre ces points est réalisée selon une grille régulière. Le MNA standard fournit des valeurs d'altitude qui reposent sur un quadrillage de 0,324 secondes d'arc en coordonnées géographiques, ce qui correspond à une résolution d'environ 10 mètres sur le terrain.

A l'aide de l'outil 3D Analyst la superficie et le volume d'eau ont pu être calculés pour différentes cotes horizontales du plan d'eau (tous les 0,05 m). La même manipulation est réalisée pour chaque entité du système (figure 5): le Vaccarès, l'Impérial, le Malagroy, le Monro, le Lion et le secteur central de la RNC que nous appelons pour simplifier « Rièges ». Ces données ont été utilisées pour calculer des relations par régression (fonctions polynomiales d'ordre 2 ou 3).

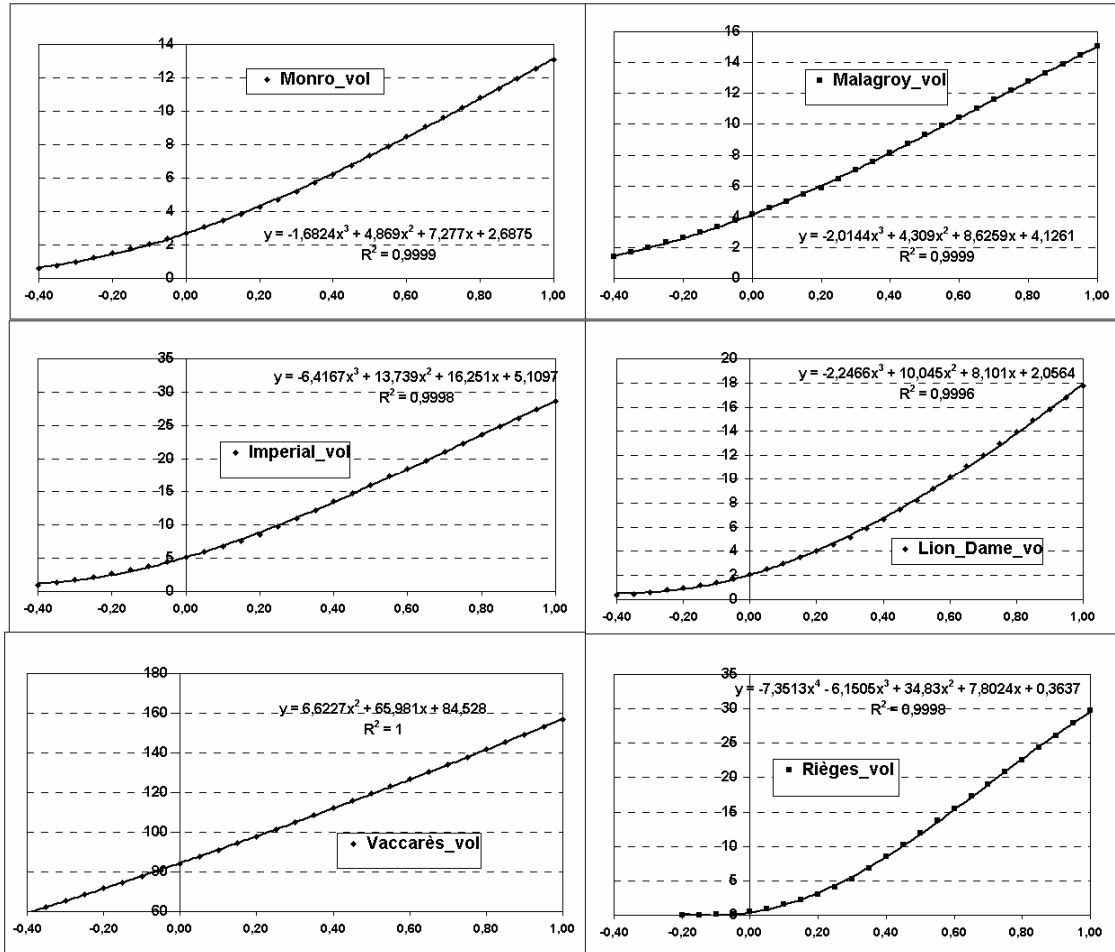


Figure 5 : Relations niveau/volume (m NGF et Mm³) pour les étangs du système Vaccarès.

Mise en relation des durées de submersion et des hauteurs d'eau avec la végétation

La Réserve Nationale de Camargue a fourni une cartographie de la végétation qui a été mise en relation avec les données bathymétriques obtenues sous Mapinfo.

La moyenne des points côtés et du nombre de jours de submersions peuvent être calculés pour chaque habitat écologique (Ce calcul est théorique car cela nécessite qu'il y ait continuité et pas d'isolement des baisses, lequel peut se produire dans certains secteurs, dès que les cotes des étangs sont inférieures à 0,2 m NGF).

Fiche thématique 3.1 : Modélisation des flux de pesticides dans l'Île de Camargue.

Responsable P. Höhener, S. Chiron

Personnel impliqué : P. Höhener, S. Chiron, L. Comoretto (Université de Provence LCP) ; P. Chauvelon, M. Pichaud (Tour du Valat, centre de recherche pour la conservation des zones humides méditerranéennes).

Etude bibliographique sur les modèles existants :

Une première tâche dans ce projet était de recenser les modèles hydrochimiques existants et d'étudier quels modèles seraient capables de simuler les flux de pesticides dans un milieu aquatique comme la Camargue. Le modèle « Hydrologie de l'Île de Camargue, **HIC** » [Chauvelon et al., 2003] représente une base validée concernant le système hydraulique de la partie centrale de la Camargue qui est la zone d'intérêt du projet GIZCAM. Bien que ce modèle prenne en compte nombre de processus hydrologiques et hydrauliques, il n'est pas été prévu pour simuler les transferts de pesticides, et leur intégration le rendra probablement trop complexe pour un usage opérationnel. Nous avons donc regardé s'il n'existait pas d'autres modèles qui pourraient être utilisés. Trois modèles concernant le transfert de pesticides des rizières vers les eaux de surface et les eaux souterraines ont été considérés : Le modèle **PADDY** [Inao et Kitamura, 1999], le modèle **PCPF-1** [Watanabe et Takagi, 2000] et le modèle **RICEWQ-VADOFT** [Karpouzias et al., 2005]. A la base, ces modèles sont similaires. **PCPF-1** est plus dynamique en ce qui concerne les paramètres météorologiques, permettant une modélisation plus précise de l'évapotranspiration, tandis que **RICEWQ-VADOFT** permet de simuler plus en détail les processus dans la zone non saturée. Ces différentes possibilités ne sont pas utiles dans des situations où les données mesurées ne sont pas suffisantes pour modéliser les flux très précisément. Pour modéliser le transfert des pesticides dans un domaine rizicole de Camargue, une version allégée de **PADDY** a été utilisée avec succès (voir section *Etude détaillée du transfert des pesticides dans un domaine rizicole*).

Le modèle **MASAS** (Modelling Anthropogenic Substances in Aquatic Systems) conçu par des chercheurs Suisses [Ulrich et al., 1995] est un outil simple et facilement compréhensible qui permet de simuler le devenir de substances anthropiques dans un lac. Les processus menant à une élimination des substances dans **MASAS** sont : la dilution, la volatilisation, la sédimentation, l'hydrolyse, la photolyse et la biodégradation. **MASAS** est capable de simuler le devenir de pesticides dans un étang aussi bien que dans un lac, pour lequel le modèle a été validé [Ulrich et al., 1994]. Malheureusement, **MASAS** ne gère pas un système hydraulique composé par plusieurs étangs interconnectés comme celui de l'Île de Camargue. Le modèle conçu pour simuler les flux et le devenir de pesticides en Camargue dans le projet GIZCAM doit donc intégrer les processus déjà pris en compte par **MASAS** dans un système hydrodynamique plus complexe. Il devrait également comprendre un module simulant les rizières en amont qui sera le pendant du modèle **PADDY**.

Validation et harmonisation des données.

Une autre tâche importante en amont d'une modélisation des flux et du devenir de pesticides en Île de Camargue est de disposer de mesures validées pour pouvoir comparer les futures simulations avec la situation réelle. Les pesticides ont été mesurés pendant les saisons culturales (Avril – Octobre) de 2004 à 2006 en 9 points d'échantillonnage (voir figure 1) dans l'Île de Camargue : dans 4 canaux (Fumemorte, Roquemaure, Albaron et Japon), et dans 5 points différents des trois étangs (Vaccarès, Impérial, et Dame). Les substances analysées comprenaient 22 pesticides et 23 produits de dégradation [Chiron et al., 2009; Comoretto, 2009].

Les données hydrologiques et météorologiques qui sont nécessaires pour modéliser le système hydrologique de Camargue, ont également été collectées pour les années 2004 – 2006. Il s'agit des paramètres suivants : les niveaux d'eau et la salinité des étangs (mensuels), les relations entre niveau et volume, les débits du canal de Fumemorte et au Grau de la Fourcade (journalier), le rayonnement

global (journalier, 4 sites), les vents (horaire, journalier, 2 sites), l'évaporation de l'eau libre (calculée selon la méthode de Penman (journalier)).

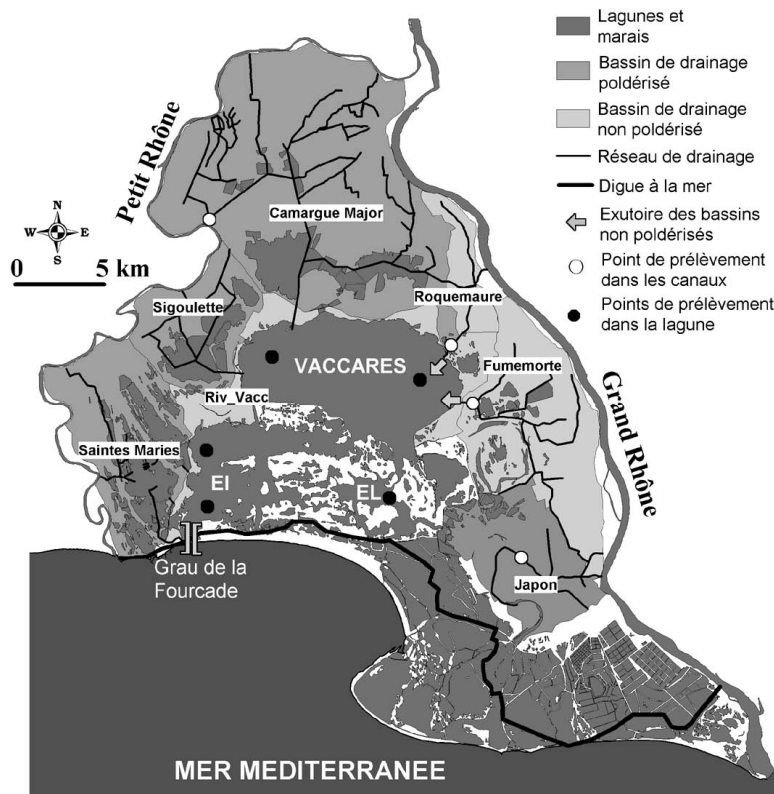


Figure 1 : localisation des points de prélèvements pour les pesticides dans l'île de Camargue.

Etude détaillée du transfert des pesticides dans un domaine rizicole.

Les données utilisées proviennent d'une étude de terrain, menée par la Tour du Valat, en collaboration avec l'Université de Provence de 2004 à 2006. Une publication de rang international a été produite sur ce sujet [Comoretto et al., 2008]. Le principal objectif était d'évaluer le taux de transfert des pesticides des rizières vers les étangs de Camargue. Il a été démontré avant, que la riziculture est la source principale de pesticides en Camargue [Comoretto et al., 2007]. Les flux entrant et sortant de pesticides ont été quantifiés en 2004 à l'échelle d'une exploitation agricole (120 ha). Ces données expérimentales ont été comparées avec des simulations d'une version simplifiée du modèle **PADDY**. L'établissement d'un bilan hydrique a conduit aux conclusions suivantes : le débit de drainage à la sortie représentait 49% du débit d'entrée. Cette différence semble due principalement au fort taux d'évapotranspiration et dans une moindre mesure, à l'infiltration de l'eau dans la nappe souterraine. Le temps de résidence de l'eau dans les champs était d'environ 18 jours. Les concentrations en pesticides ont été suivies en 4 points répartis sur l'ensemble du site, à raison d'un prélèvement tous les 15 jours. On a suivi principalement 4 matières actives (l'alphaméthrine, le MCPA, l'oxadiazon et le prétilachlore), présentant des propriétés physico-chimiques différentes et utilisées sur l'exploitation en 2004. L'alphaméthrine n'a jamais été détectée alors que les 3 autres pesticides ont été retrouvés dans les eaux avec des pics de concentrations allant de 5,2 à 28,2 $\mu\text{g}\cdot\text{L}^{-1}$. La persistance de ces pics s'est avérée moins importante pour le MCPA et le prétilachlore que pour l'oxadiazon. La simulation de ces données expérimentales a été réalisée au moyen du modèle **PADDY** simplifié qui prend en compte les phénomènes de volatilisation, dégradation, infiltration dans la nappe et de sorption dans les sols. Les paramètres de biodégradation et de sorption sont issus de la littérature, alors que les paramètres de volatilisation proviennent d'un modèle d'échange air-eau. Le modèle testé a bien montré que la part de perte par volatilisation est négligeable, mis à part pour l'alphaméthrine, et que l'infiltration est une voie de dissipation mineure pour les 4 composés étudiés. Les pertes d'alphaméthrine par écoulement d'eau ne représentent que 0,4% de la quantité totale

appliquée, ce composé étant préférentiellement adsorbé et assez volatil. Cependant les pertes par écoulement d'eau représentent entre 13 et 29% des quantités appliquées pour les 3 autres composés étudiés. Ces résultats peuvent s'expliquer par leur forte solubilité dans l'eau et leur faible volatilité. Cette voie de transfert est la plus importante pour le MCPA, le composé le plus soluble dans l'eau.

Modèle pesticide intégré pour la Camargue:

Les travaux scientifiques principaux réalisés au cours du projet GIZCAM ont permis la mise en oeuvre un nouveau modèle pour simuler les substances chimiques dans l'hydrosystème de L'île de Camargue. Il porte l'acronyme **HSC PEST** (Hydrosystème de Camargue – intégrant les flux et le devenir des pesticides). Il reprend les formalismes mathématiques et chimiques déjà utilisés dans les modèles **PADDY** (rizières) et **MASAS** (étangs) et combine ces derniers pour simuler l'hydrosystème de l'Île de Camargue. MASAS est donc utilisé en amont pour modéliser la réactivité des polluants, et HSC PEST en aval pour la répartition spatio-temporelle. Le modèle fonctionne dans l'environnement MAPLE, un logiciel qui permet le calcul des équations différentielles couplées. Comme dans le modèle **HIC**, l'hydrosystème de l'Île de Camargue est simulé en trois unités, qui sont : l'étang du Vaccarès, la sous unité « étang des Impériaux » (une masse d'eau de transition entre le Vaccarès et la mer qui comporte les étangs de Monroe, de Malagroy, et de l'Impérial), et la sous unité Dame/Lion (ces deux derniers étangs présentent des échanges d'eau importants entre eux, ce qui permet de les traiter en une seule unité).

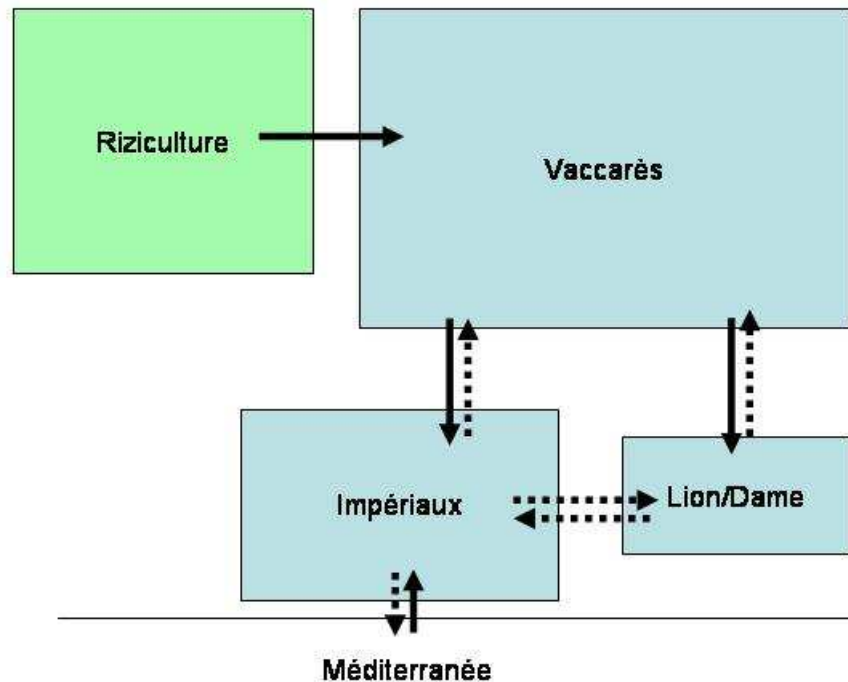


Figure 2 : Représentation schématique de l'hydrosystème simplifié de l'Île de Camargue, avec les flux d'eau principaux pendant la saison de culture (flèches noires) et les flux d'eau possibles pendant les autres saisons (flèches pointillés).

Dans **HSC PEST**, six variables sont calculées : les trois volumes d'eau des étangs, et les trois concentrations d'un pesticide dans les étangs. Les pesticides sont apportés par les eaux de drainage de la zone rizicole vers le Vaccarès, qui est le seul étang qui reçoit directement des surplus de l'eau d'irrigation des rizières. Le transfert des pesticides des rizières vers le Vaccarès est assuré par les flux des canaux. Les données de concentrations de pesticides dans 4 canaux ont montré des pics qui suivent des distributions normales. Le modèle simule donc les entrées de pollution dans l'étang du Vaccarès par des courbes Gaussiennes. Ces fonctions de concentration d'un pesticide entrant au Vaccarès se traduisent ensuite par un pic dans cet étang, suivi du transfert vers les deux autres étangs. Dans

MASAS, une constante globale d'élimination est attribuée pour chaque pesticide et pour chaque étang, qui représente la somme de tous les processus d'élimination (par volatilisation, sédimentation, photolyse et biodégradation) dans l'étang spécifié. La forte évaporation de l'eau des étangs situé au sud du Vaccarès et le faible taux de renouvellement d'eau fait que les concentrations de pesticides peuvent atteindre des niveaux égaux voir supérieurs à ceux rencontrés dans le Vaccarès. Le modèle HSC PEST a été testé avec différentes configurations de débits d'eau et de comportement de pesticides. L'ajout de deux produits de dégradation a aussi été intégré dans HSC PEST. Pour 5 pesticides, les taux d'élimination dans l'étang de Vaccarès ont été modélisés à partir des données de vitesses d'élimination tirées de la littérature. A titre d'exemple, un calcul est proposé en annexe pour l'herbicide Bentazone. Les calculs sont rapides et fiables.

Les derniers travaux de ce projet ont inclus: 1) une calibration du modèle HSC PEST en utilisant les données de salinité et de pesticides mesurés entre 2004 et 2006 dans les canaux et les étangs ; 2) l'adaptation des processus photochimiques selon les dernières avancées de la science, notamment concernant la photochimie indirecte ; 3) l'incorporation des produits de dégradation ; et 4) l'élaboration d'un format plus convivial et plus accessible pour les futurs utilisateurs du modèle.

Le modèle a été présenté lors du congrès « *5th European congress on pesticides and related organic micropollutants in the environment* » qui se déroulait en octobre 2008 à Marseille [Höhener et al., 2008]. Une publication sur le modèle HSC PEST est soumise à la revue « *Environmental Modelling and Software* ». [Höhener et al., 2009]. Enfin, les travaux seront présentés en décembre 2009 lors du 4ème Congrès européen sur les Lagunes Côtières, Recherche et Gestion pour la conservation des Ecosystèmes Lagunaires Côtiers, Comparaisons Sud-Nord, Montpellier, du 14 au 18 décembre 2009.

Publications issues directement du projet GIZCAM

- Höhener, P., L. Comoretto, S. Ferrand, P. Chauvelon, M. Pichaud et S. Chiron, 2008.** Modeling the fate of pesticides in the coastal wetlands of the Camargue. In: S. Barbati et S. Chiron (Hrsg) "5th European congress on pesticides and related organic micropollutants in the environment, Marseille", Université de Provence, Poster + Abstract 2 pages.
- Höhener, P., L. Comoretto, F. Al Housari, P. Chauvelon, M. Pichaud, Y. Chérain et S. Chiron, 2009.** Modeling anthropogenic substances in coastal wetlands: application to herbicides in the Camargue (France). *Environmental Modelling and Software*, soumise.

Autres références bibliographiques

- Chauvelon, P., M.G. Tournoud et A. Sandoz, 2003.** Integrated hydrological modelling of a managed coastal Mediterranean wetland (Rhône delta, France): initial calibration. *Hydrology and Earth Systems Sciences* 7, 123-131.
- Chiron, S., 2007.** Pesticides en Camargue: Source, transport et devenir. Rapport final destiné à l'Agence de l'Eau "Rhône-Méditerranée-Corse". Université de Provence, Laboratoire de Chimie et Environnement.
- Chiron, S., L. Comoretto, E. Rinaldi, V. Maurino, C. Minero et D. Vione, 2009.** Pesticide by-products in the Rhône delta (Southern France). The case of 4-chloro-2-methylphenol and of its nitroderivative. *Chemosphere* 74, 599-604.
- Comoretto, L., 2009.** L'étude des herbicides dans la phase dissoute des eaux superficielles Camarguaises. Apport, Transfert et Devenir. Thèse doctorale, Université de Provence, pp pages.
- Comoretto, L., B. Arfib et S. Chiron, 2007.** Pesticides in the Rhône river delta (France): Basic data for a field-based exposure assessment. *Sci Total Environ* 380, 124-132.
- Comoretto, L., B. Arfib, R. Talva, P. Chauvelon, M. Pichaud, S. Chiron et P. Höhener, 2008.** Runoff of pesticides from rice fields in the Ile de Camargue (Rhône river delta, France): Field study and modeling. *Environ Pollut* 151, 486-493.
- Inao, K. et Y. Kitamura, 1999.** Pesticide paddy field model (PADDY) for predicting pesticide concentrations in water and soil in paddy fields. *Pestic Sci* 55, 38-46.

- Karpouzas, D.G., A. Ferrero, F. Vidotto et E. Capri, 2005.** Application of the RICEWQ-VADOFT model for simulating the environmental fate of pretilachlor in rice paddies. *Environ. Tox. Chem.* 24, 1007-1017.
- Ulrich, M.M., D.M. Imboden et R.P. Schwarzenbach, 1995.** MASAS - A User-friendly Simulation Tool for Modelling the Fate of Anthropogenic Substances in Lakes. *Environ. Software* 10, 177-198.
- Ulrich, M.M., S.R. Müller, H.P. Singer, D.M. Imboden et R.P. Schwarzenbach, 1994.** Input and dynamic behavior of the organic pollutants tetrachloroethene, atrazine, and NTA in a lake - a study combining mathematical-modeling and field-measurements. *Environ. Sci. Technol.* 28, 1674-1685.
- Watanabe, H. et K. Takagi, 2000.** A simulation model for predicting pesticide concentrations in paddy water and surface soil. I. Model development. *Environmental Technology* 21, 1379-1391.

Fiche thématique 3.2 Quantification des apports d'eaux souterraines à l'étang du Vaccarès.

Responsable : O. Radakovitch CEREGE

Les progrès réalisés durant la dernière décennie sur la mesure de certains isotopes radioactifs naturels ont permis de mettre en évidence sur quelques zones côtières (lagunes, littoral, marais...) l'importance d'apports d'eaux souterraines par diffusion à travers le sédiment. Ce type d'apport, extrêmement difficile à évaluer comparé à ceux des rivières, induit l'injection d'eau douce ou saumâtre dans le système et peut avoir un impact important sur les zones qu'il affecte si l'eau souterraine contient de fortes concentrations en nutriments ou contaminants. S'ils sont le plus souvent visibles et connus dans les zones calcaires karstiques où ils sont bien chenalés (source de la Vise à Thau, source de Port-Miou), ils sont invisibles et très difficiles à étudier dans les aquifères sédimentaires tel que le delta du Rhône où l'eau circule de manière diffuse. Ces apports sont associés au gradient de charge hydraulique au sein de l'aquifère qui « pousse » l'eau souterraine des zones sous fortes pressions vers les moins fortes. Plus la nappe sera en charge, plus le flux d'eau sera important. Les faibles altitudes du delta de Camargue ne permettent pas de créer de gradient important mais la nappe de surface affleurant au Nord de l'étang du Vaccarès est susceptible d'induire ce type d'apport par diffusion dans l'étang. Dans la zone des étangs inférieurs, ce gradient peut réagir à la différence de hauteur entre le niveau marin et celui des étangs : lorsque la mer est haute, elle peut « pousser » par pression les eaux souterraines de subsurface dans les étangs.

Le ^{222}Rn est un radioélément naturel qui, grâce à des progrès analytiques récents, peut être utilisé comme « traceur » des apports d'eau souterraine dans les eaux de surface. Cette approche a été mise en place dans GIZCAM pour évaluer ces apports à l'étang du Vaccarès. L'idée initiale était de travailler sur l'ensemble des étangs, mais des difficultés décrites dans l'encart final ont limité ce travail au Vaccarès.

CONCEPT

Le ^{222}Rn est un gaz radioactif produit dans les eaux souterraines suite à la désintégration d'autres éléments radioactifs que sont l'uranium et le radium présents dans toutes les roches ou sédiments encaissants. L'eau souterraine étant confinée, le ^{222}Rn peut y être produit en quantité et les activités qui s'y forment peuvent atteindre plusieurs milliers de Becquerel par m^3 (Bq/m^3). Cet élément est également produit dans toutes les eaux de surface (lagunes, étangs, fleuve...) par les mêmes parents radioactifs, mais le fait que leurs teneurs y soient nettement plus faibles et que ce gaz s'échappe vers l'atmosphère fait que ses activités y sont seulement de quelques dizaines de Bq/m^3 . Si ces eaux de surface reçoivent des apports d'eau souterraine, on peut donc s'attendre à y voir un fort enrichissement dans les activités de ^{222}Rn .

L'approche conceptuelle pour déterminer ces apports consiste à établir le bilan du ^{222}Rn en évaluant les flux entrants et sortants du système (figure 1). En supposant que tout ce qui rentre ressort d'un tel système (état stationnaire), le flux de ^{222}Rn ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{j}^{-1}$) entrant avec les eaux souterraines peut être déduit de tous les autres. Le flux d'eau souterraine proprement dit ($\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$) est ensuite calculé en connaissant la concentration du ^{222}Rn dans ces eaux.

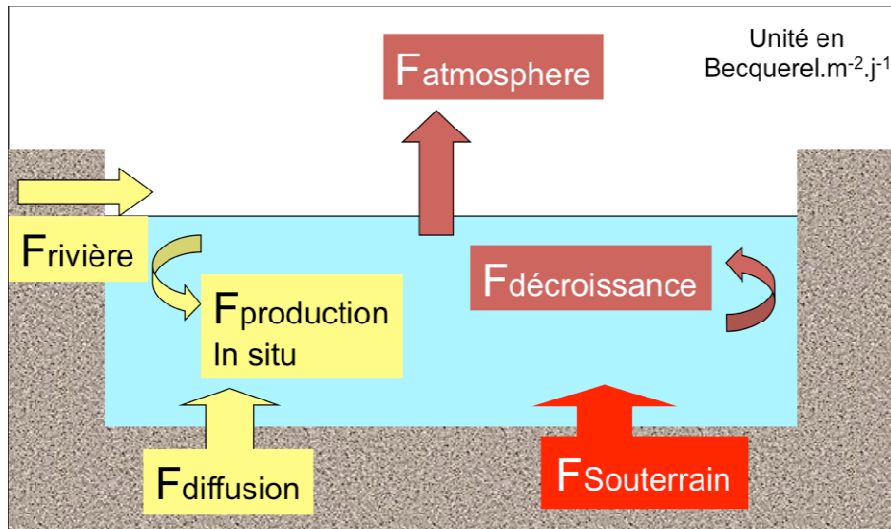


Figure 1 : Flux de radon-222 entrant et sortant dans l'étang du Vaccarès. Si le système est en équilibre, la somme des flux entrants (en jaune et rouge) doit être équivalente à celles des flux sortants (en bleu). Le flux apporté par les eaux souterraines doit donc être égal à : Rivières + production + diffusion – Décroissance – atmosphère.

CALCUL DES FLUX

Le bilan des flux de ^{222}Rn a été réalisé dans le Vaccarès en Juin 2006 et Juin 2008. Dans chaque cas les flux ont été mesurés de la manière suivante :

1) Flux entrants :

- Le flux des rivières est généralement négligeable car les activités en ^{222}Rn y sont faibles. Ce n'a pas été le cas cependant pour le Vaccarès car les activités mesurées à différentes périodes dans le canal de Fumemorte (variations entre 200 et 400 Bq/m³) se sont révélées assez fortes, probablement à cause de l'alimentation de ce canal par des eaux ayant transité pour partie dans les sols. Ce flux a été estimé en multipliant les activités mesurées dans Fumemorte au cours des deux missions avec le débit du canal (données Tour du Valat) et extrapolées aux apports totaux du bassin versant (en multipliant par 1.87).

- Le flux produit in situ dans les eaux de l'étang dépend des activités de l'élément radioactif produisant directement le ^{222}Rn , à savoir le Radium-226. Cet élément est supposé peu variable dans le temps et nous avons utilisé les activités mesurées en 2005 par Ollivier (2006, Thèse Univ. P Cézanne) pour le calcul de ce flux.

- Le flux issu de la diffusion à partir du sédiment est un des plus difficiles à quantifier. Il résulte des concentrations de ^{222}Rn produites dans les eaux interstitielles des premiers centimètres du sédiment par désintégration du radium et de l'uranium présents dans les sables. Ces concentrations étant supérieures à celles de la colonne d'eau immédiatement au dessus du sédiment créent un flux depuis le sédiment vers la colonne d'eau par simple effet de diffusion (comme lorsque de l'eau salée est au contact de l'eau douce). Pour estimer ce flux, nous avons prélevé des échantillons de sédiment (6 sites) que nous avons inséré dans des bouteilles fermées avec de l'eau similaire à celle de l'étang. Les activités de ^{222}Rn formées dans les eaux de ces bouteilles après quelques jours d'équilibre permettent d'estimer le flux pouvant être issu de la diffusion du sédiment.

2) Flux sortants:

- Une partie du ^{222}Rn amené ou produite dans l'eau de surface disparaît rapidement par décroissance radioactive (50% tous les 4 jours). Pour estimer ce flux, il faut disposer des

activités de ^{222}Rn présentes dans l'eau de l'étang. Sept sites ont été mesurés pour ceci dans l'étang au cours des deux campagnes avec l'aide du personnel de la Réserve. Les activités ont été intégrées en fonction de la hauteur de la colonne d'eau et du volume d'eau de l'étang (données Tour du Valat et Réserve Nationale) afin d'évaluer une valeur globale pour tout l'étang. Nous avons supposé que durant les missions il n'y avait pas d'échange important entre l'étang du Vaccarès et les étangs inférieurs.

- Le ^{222}Rn étant un gaz, une partie va s'échapper de la colonne d'eau vers l'atmosphère. L'intensité de cet échange dépend de la différence entre les activités dans l'eau et l'atmosphère, de la température et surtout de la vitesse du vent. Les activités dans l'air n'ont pu être évaluées qu'en 2008 avec l'acquisition d'un appareil spécifique, mais elles sont très faibles et ces mêmes valeurs ont été utilisées pour calculer le bilan de 2006. Ce flux atmosphérique est une composante majeure du bilan, et il faut noter que les deux périodes de mesures ont été marquées par des vents (mesurés à 10 m du sol) assez différents de respectivement 1,3 et 4,2 m/s.

RÉSULTATS

Les valeurs de chacun des flux estimés pour juin 2006 et 2008 sont synthétisées en figure 2. Afin de prendre en compte les variations parfois observées dans les activités (variations temporelles ou spatiales), les valeurs minimales et maximales des flux sont reportées. Ces variations restent toutefois très faibles au regard du bilan.

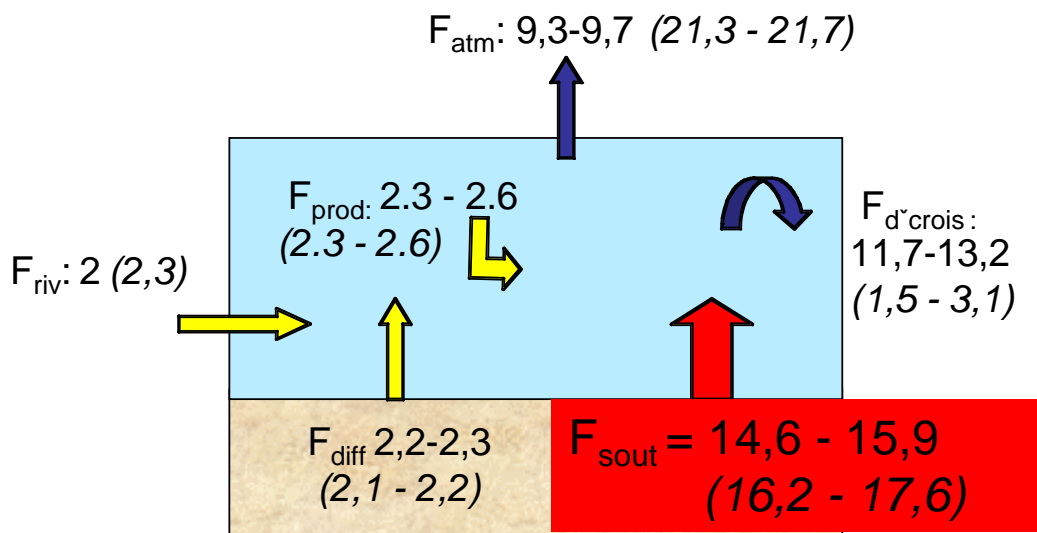


Figure 2 : bilan des flux de ^{222}Rn entrants et sortants de l'étang du Vaccarès en Juin 2006 et Juin 2008 (entre parenthèses). Unités en $\text{Bq/m}^2/\text{jour}$.

Les différentes conditions de vent de 2006 et 2008 ont entraîné de fortes variations dans le flux s'échappant vers l'atmosphère et dans les quantités de ^{222}Rn restantes dans l'eau. Malgré ce changement drastique, le flux de ^{222}Rn qui doit entrer dans l'étang par les eaux souterraines pour que le bilan soit équilibré reste le même, entre 15 et 18 $\text{Bq/m}^2/\text{j}$.

Le flux d'eau entrant qui correspond à cette valeur est calculé en divisant ce chiffre par l'activité en ^{222}Rn des eaux souterraines. Il faut pour ceci disposer de sites de prélèvements équipés de piézomètres permettant de prélever les eaux souterraines proches de la surface et susceptibles de pénétrer dans l'étang. Nous ne disposons pas à ces dates de sites de

prélèvements adaptés (à proximité directe de l'étang et en subsurface) et nous avons utilisé les activités mesurées dans des eaux souterraines plus profondes (entre 7 et 28 m de profondeur) prélevées dans des piézomètres recensés par le programme de recherche ORE RESYST. Les activités y sont d'une assez grande variabilité (figure 3) avec une moyenne de l'ordre de $8720 \pm 900 \text{ Bq/m}^3$.

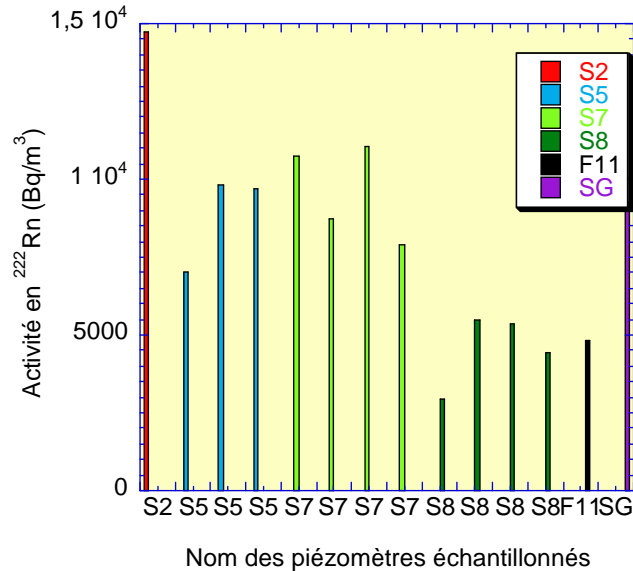


Figure 3 : Activités de ^{222}Rn mesurées de juin 2006 à juin 2008 dans différents piézomètres de Camargue prélevant l'eau entre 9 et 28 m de profondeur.

Si cette valeur moyenne est représentative des eaux souterraines entrantes, le flux d'eau souterraine nécessaire pour expliquer le flux de la figure 2 doit être compris entre **1,3 et 1,5 m³/s**. Ces valeurs sont similaires à un premier bilan indépendant réalisé par Ollivier (2006) entre février et juin 2004 sur la base des volumes d'eau et des teneurs en sels et qui donnait une valeur de 1,2 m³/s. **Si de tels chiffres semblent importants, ils ne représentent en volume total journalier que 0,14% de celui du système d'étang mais sont tout de même équivalents à 24% des apports estimés issus des canaux à ces périodes.** Ces eaux constituent donc une entrée non négligeable comparées aux eaux de surface qui pourrait amener à cet étang des composés particuliers (pesticides notamment) et encore peu étudiés. Enfin, il faut noter que les deux campagnes ont été faites en période de relative faible charge des nappes (tout de même « gonflée par la submersion des rizières) et que ces apports sont potentiellement plus importants à la fin de la saison rizicole avec un niveau de l'étang plus bas, donc un gradient hydraulique avec la nappe plus important, (cote du Vaccarès d'environ 0 m NGF en juin 2006 et 2008, atteignant respectivement -0.17 et -0.1 m NGF début septembre); et en hiver après les pluies automnales.

Les eaux souterraines mesurées dans les piézomètres entourant l'étang montrent des salinités très variables entre 2 et 39 mg/l et il est donc très difficile d'estimer leur rôle sur la salinité de l'étang. Elles sont de toute façon plus salées que les apports des canaux et ne peuvent qu'augmenter le bilan en sel du Vaccarès.

Quelle approche possible pour les étangs inférieurs ?

L'expérience de terrain acquise au Vaccarès a montré que cette étude ne peut pas être appliquée facilement à la zone des étangs inférieurs pour deux raisons. La première est une

question de logistique. La mesure du ^{222}Rn requiert actuellement un système de pompage lourd et encombrant qu'il est très difficile de transporter dans cette zone, notamment en période de très basses eaux. La deuxième est liée à la configuration de cette zone avec des niveaux d'eaux très bas (10 à 20 cm par endroits). Avec de telles hauteurs et les conditions de vent régnant habituellement, le dégazage du ^{222}Rn produit dans l'eau vers l'atmosphère risque d'être très important et hétérogène dans l'espace et le temps, entraînant des erreurs importantes sur le calcul du bilan. Ce problème pourrait être contourné par l'utilisation d'autres radioéléments naturels que sont le Radium-223 et le Radium-224. Ces deux éléments sont également introduits par des apports d'eaux souterraines mais contrairement au ^{222}Rn ils restent sous forme dissoute sans perte vers l'atmosphère. Bien que plus complexes à mesurer, ils pourraient constituer des traceurs adaptés à ce type de zone.

Fiche thématique 4.1 Erosion du rivage en aval dérive des épis

Responsable : F. Sabatier, CEREGE

INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

Depuis les années 80, la mise en place d'épis (enrochements perpendiculaires au rivage) est une pratique généralisée en Camargue mais aussi dans le Languedoc-Roussillon afin de tenter de stabiliser le rivage. Les épis sont censés bloquer les sédiments qui transitent parallèlement au rivage sous l'action du courant de dérive littorale. Les épis sont théoriquement utilisés pour fixer la position du rivage et leurs effets secondaires les plus connus concernent l'érosion en aval dérive. En effet, dans ce secteur, du fait du blocage des sédiments par les enrochements, le recul du rivage s'accélère. Ce problème bien connu est souvent (toujours ?) minimisé par les concepteurs des épis qui affirment que cette érosion finira par se stabiliser. Par exemple, les modèles numériques d'ingénierie côtière (type GENESIS) indiquent une situation d'équilibre sédimentaire où le rivage cesse d'évoluer quelques années après la construction d'une batterie d'épis.

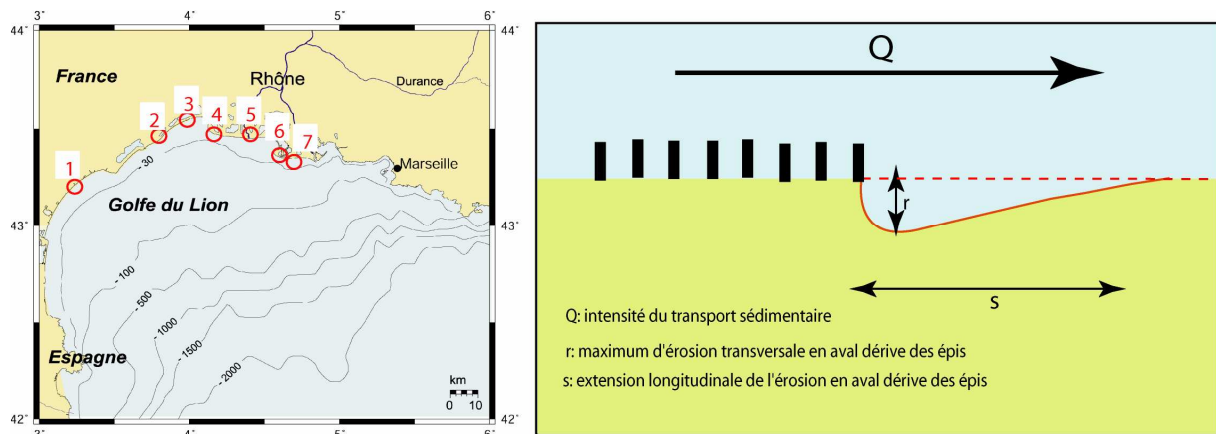


Figure 1. Localisation des sites d'études (à gauche) et paramètres utilisés pour définir l'érosion en aval dérive (à droite). 1-Grau de Vendres, 2-Frontignan, 3- Carnon, 4-Les Baronnets, 5- La Fourcade, 6-Véran, 7-La Courbe.

Nous avons voulu ici vérifier si l'érosion en aval dérive des épis se stabilise dans le temps car l'expérience empirique du terrain montrait des résultats plutôt contraire. Afin de proposer une « règle » sur l'érosion en aval dérive des épis, il nous fallait observer ce phénomène sur plusieurs sites, nous avons donc choisit de rajouter aux sites camarguais de ce programme Liteau, 3 sites dans le Languedoc-Roussillon (fig.1). Les résultats présentés ici sont tirés de la thèse d'Olivier Samat (2007) financée en partie par GIZCAM. Le lecteur pourra se référer à cette thèse en ligne sur le site du Parc Naturel Régional de Camargue pour plus d'informations (http://www.parc-camargue.fr/Francais/download.php?categorie_id=97). Nous présentons le site de la Fourcade, à l'Est des Saintes-Maries-de-la-Mer car cette zone est aussi investiguée de manière plus large (cf infra) dans GIZCAM.

UNE EROSION QUI NE SE STABILISE PAS

Sur le site de la Fourcade, à l'Est des Saintes-Maries-de-la-Mer, le blocage des sédiments par les ouvrages et les épis se traduit par une érosion plus importante, elle double à partir de 1977 (-4 m/an entre 1872 et 1997 contre -9 m/an environ entre 1977 et 2005) (fig.2 et 3). Sur l'ensemble des sites, le recul du rivage mesuré en aval dérive après la construction des épis est de 2 à 5 fois supérieur à celui observé avant les enrochements (Samat, 2007).

Dans le temps, et contrairement à ce qui est attendu par l'ingénierie qui préconise les épis, le recul maximal (r) et la distance de ce recul (s) ne se stabilisent pas, du moins durant la période d'observations proche de 30 années (fig. 3). Cette évolution est aussi observée sur tous les sites d'études.

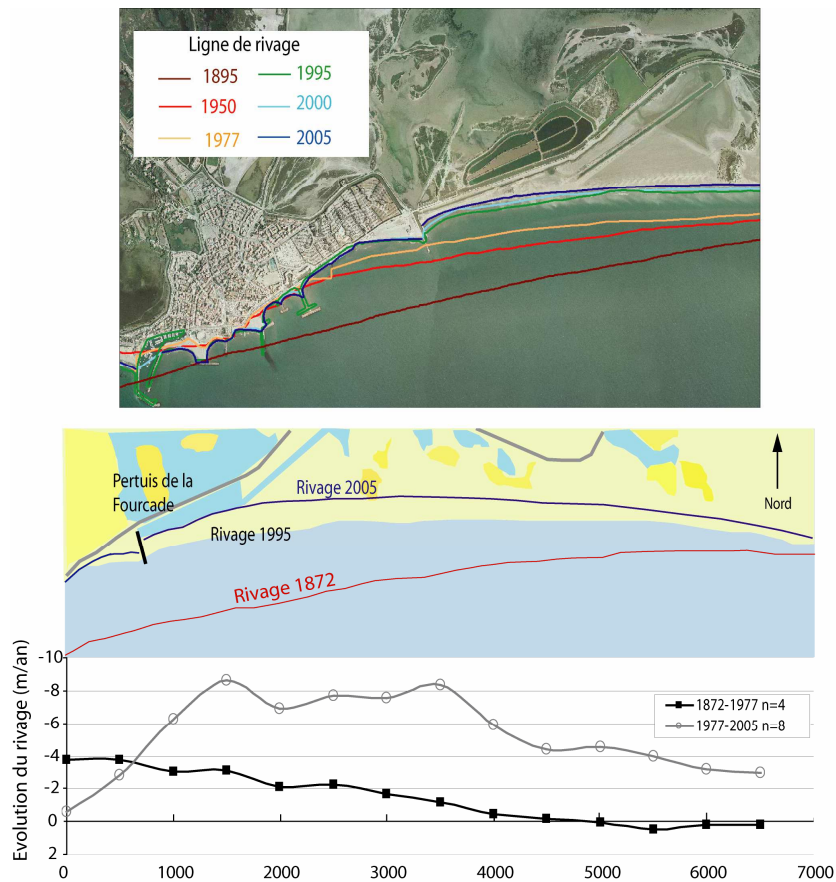


Figure 2. Evolution du rivage sur le site de la Fourcade

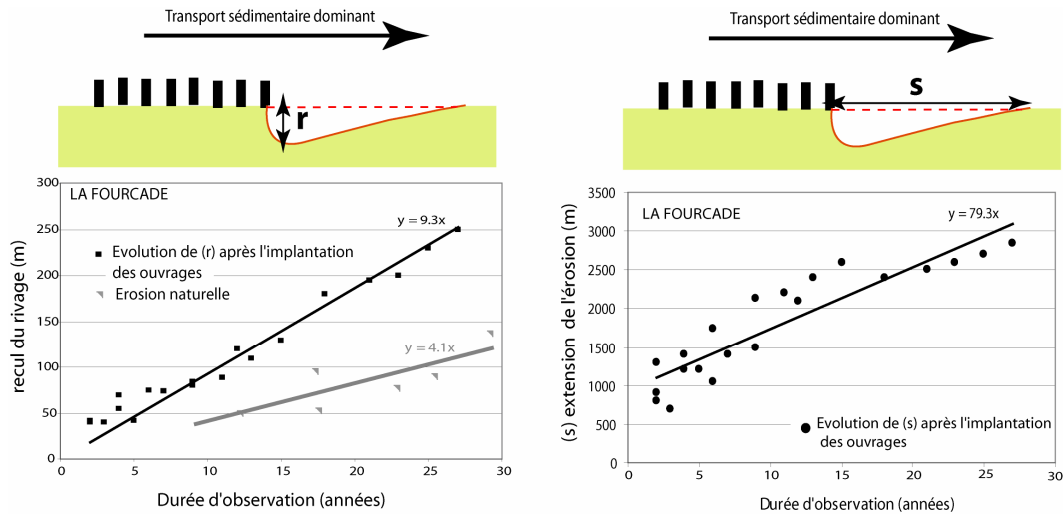


Figure 3. Evolution temporelle de l'érosion aval dérive sur le site de la Fourcade

VERS UNE QUANTIFICATION DE L'ÉROSION AVAL DERIVE CAUSEE PAR LES ÉPIS

Sans grande surprise, les paramètres d'érosion aval dérive « r » et « s » sont très bien corrélés avec les valeurs du transit littoral (fig. 4). Par contre, nous n'avons pas trouvé de corrélations significatives avec la longueur des épis ou la distance sur laquelle ils sont implantés (batterie d'épis). Nous proposons aux ingénieurs et aux gestionnaires deux équations empiriques simples qui permettraient d'estimer les paramètres d'érosion aval dérive « r » et « s » 20 ans après la mise en place des épis :

$$r = 0,3 \cdot 10^{-4} Q$$

$$s = 0,7 \cdot 10^{-3} Q$$

avec r et s en mètres et Q qui représente le transit littoral exprimé en m³/an

Tous les détails et les résultats issus de ce travail sont précisément décrits dans la thèse d'Olivier Samat (2007).

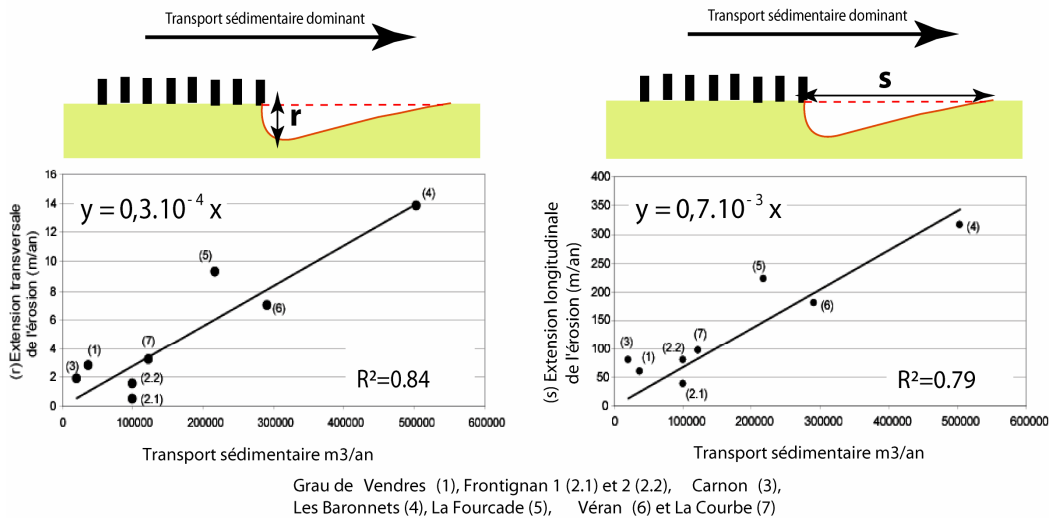


Figure 4. Relations de l'érosion aval dérive avec le transit littoral (Q)

CE QU'IL FAUT RETENIR

L'érosion en aval dérive causée par des épis ne se stabilise pas dans le temps, contrairement à ce que prévoient les pratiques d'ingénierie. En effet, par rapport aux périodes ante enrochements, le recul du rivage est de 2 à 5 fois supérieurs après la construction des ouvrages. Spatialement, cette érosion se prolonge aussi le long du rivage sans se stabiliser, du moins durant la durée d'observations (30 ans). Notre analyse propose aux gestionnaires des méthodes simples de prévisions de l'érosion en aval dérive des épis.

Fiche thématique 4.2 Impact d'une digue frontale sur l'érosion des fonds. Le cas de la digue de Véran

Responsable : F. Sabatier, CEREGE

INTRODUCTION ET PROBLEMATIQUE

L'utilisation des digues frontales en enrochements pour protéger les côtes et limiter les inondations de tempêtes est une pratique courante en ingénierie côtière mais leur impact demeure encore mal connu. Dans le secteur de Faraman, la digue de Véran a été reconstruite à la suite d'une tempête exceptionnelle pour limiter les inondations marines dans les salins. Afin de déterminer l'impact de cet endiguement, une surveillance bathymétrique a été réalisée devant la digue de Véran (fig.1).

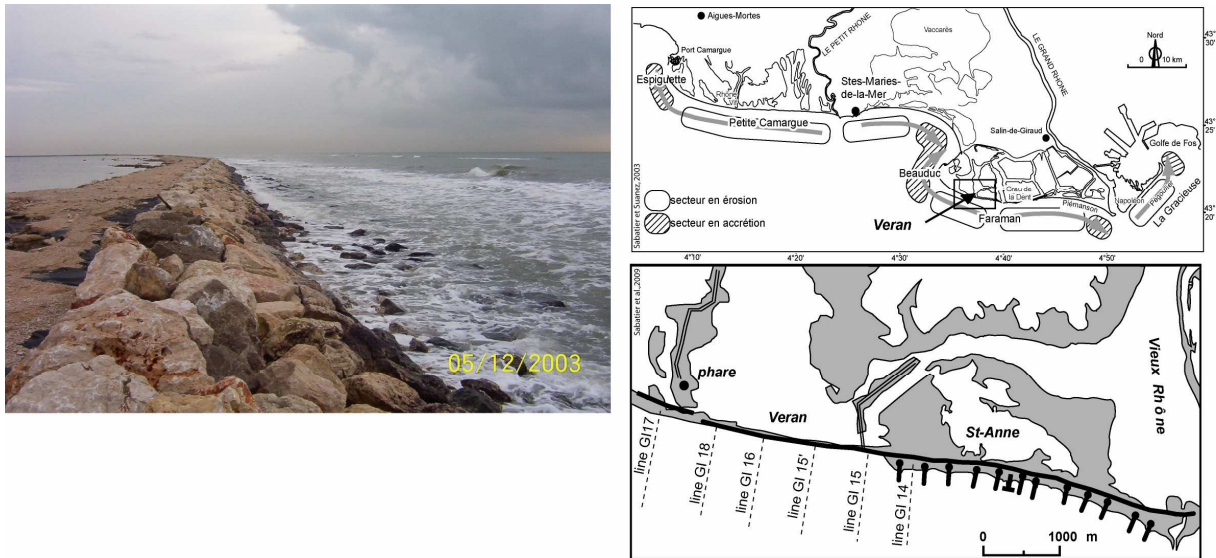


Figure 1: Situation du site d'étude, localisation des profils bathymétriques et photo de la digue de Véran.

HISTORIQUE DE L'OUVRAGE EN ENROCHEMENT

Avant la construction en 1998 de la digue qui s'étend désormais sur 2,7km, la plage reculait à des vitesses comprises entre -3 et -8 m.an^{-1} , principalement à cause d'une augmentation du gradient du transit littoral, dont la diminution à l'Ouest se traduit par une forte sédimentation (flèche de Beauduc). En réalité, la digue frontale, présente depuis 1998, pouvait être considérée comme une digue de haut de plage avant cette date car le rivage se trouvait alors à plusieurs dizaines de mètres. Construite dans les années 1970 cette digue était originellement destinée à contenir les inondations liées aux tempêtes qui mettaient en danger l'industrie salinière. Suite au recul continu de la plage et à une tempête cinquantennale en 1997, la digue s'est complètement détruite puis elle a été reconstruite l'année suivante au même emplacement. Cette digue de haut de plage devenait alors une digue frontale (fig.1-2).

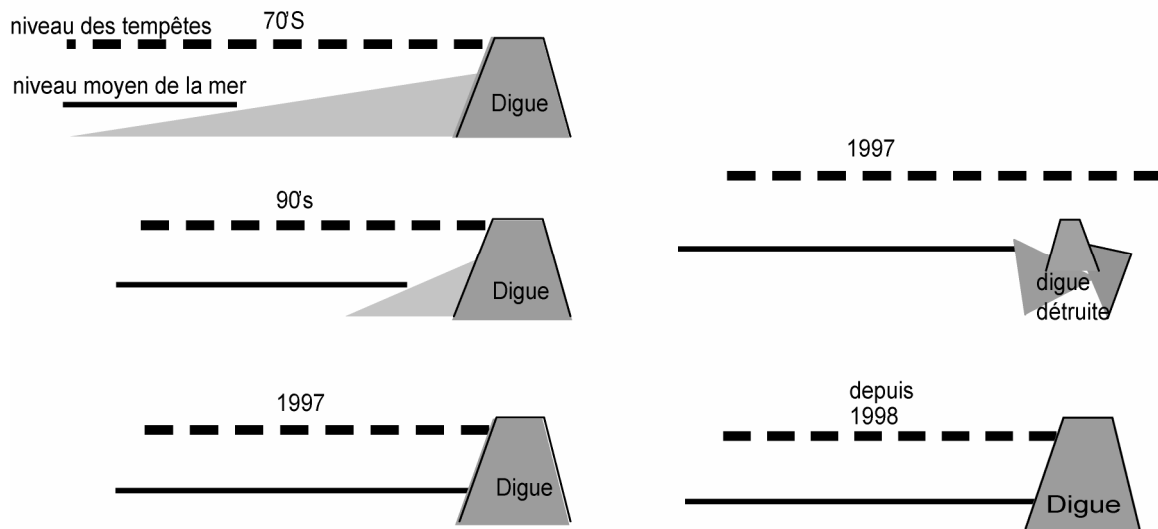


Figure 2 : Evolution historique de la digue.

L'ACCELERATION DE L'EROSION SOUS MARINE DU PROFIL

Afin de déterminer si la digue augmente les processus d'érosion, nous avons d'abord comparé les bilans sédimentaires des profils avant (1988-1998) et après (1998-2004) la mise en place de l'ouvrage (fig. 3). Tous les profils bathymétriques indiquent la présence d'un approfondissement au pied de la digue (fig. 4) qui correspond aussi à la fosse interne entre le rivage et la barre interne. Nous avons donc ensuite comparé l'évolution de la fosse à partir des mêmes relevés.

En terme de bilans sédimentaires moyens annuels, le secteur d'étude est déficitaire au moins depuis 1988, mais jusqu'en 1998 (reconstruction de la digue) il n'y a pas de différences significatives entre les profils. Par contre, entre 1998 et 2004, le bilan sédimentaire est toujours déficitaire mais les profils au milieu et à l'ouest de la digue affichent une érosion plus importante et indiquent une organisation longitudinale de l'érosion, dans le sens de la dérive littorale dominante (fig.3). Finalement ces résultats montrent une augmentation de l'érosion des profils après la construction de la digue mais aussi une érosion plus forte devant cette dernière. Enfin, il semble que l'érosion soit croissante dans le sens du transit longitudinal dominant.

Les profils de part et d'autre de l'ouvrage présentent une évolution de leur fosse interne relativement régulière et homogène entre 1988 et 2004, avec une légère tendance à l'approfondissement (fig. 4). En revanche sur les profils au droit de l'ouvrage, un creusement important apparaît après 1998, avec des valeurs comprises entre -1 et -2m, entre 1988 et 1997, et des valeurs proches de -4 à -5m en 2004. Dans le détail, la fosse interne du profil GI15, pourtant en face de la digue ne montre pas d'évolution particulière. Ici encore, on suppose une organisation longshore de l'influence de la digue car ce profil qui ne semble pas perturbé par l'ouvrage en enrochement se situe en amont du transit littoral dominant. Finalement l'augmentation de la profondeur de la fosse interne devant la digue est interprétée comme un affouillement directement lié à la présence de l'ouvrage.

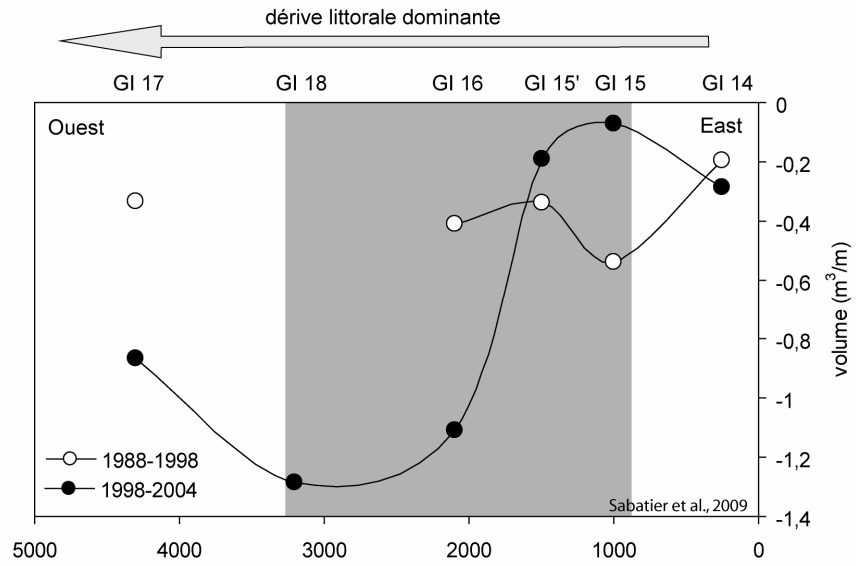


Figure 3 : Bilans sédimentaires des profils bathymétriques depuis 1988.

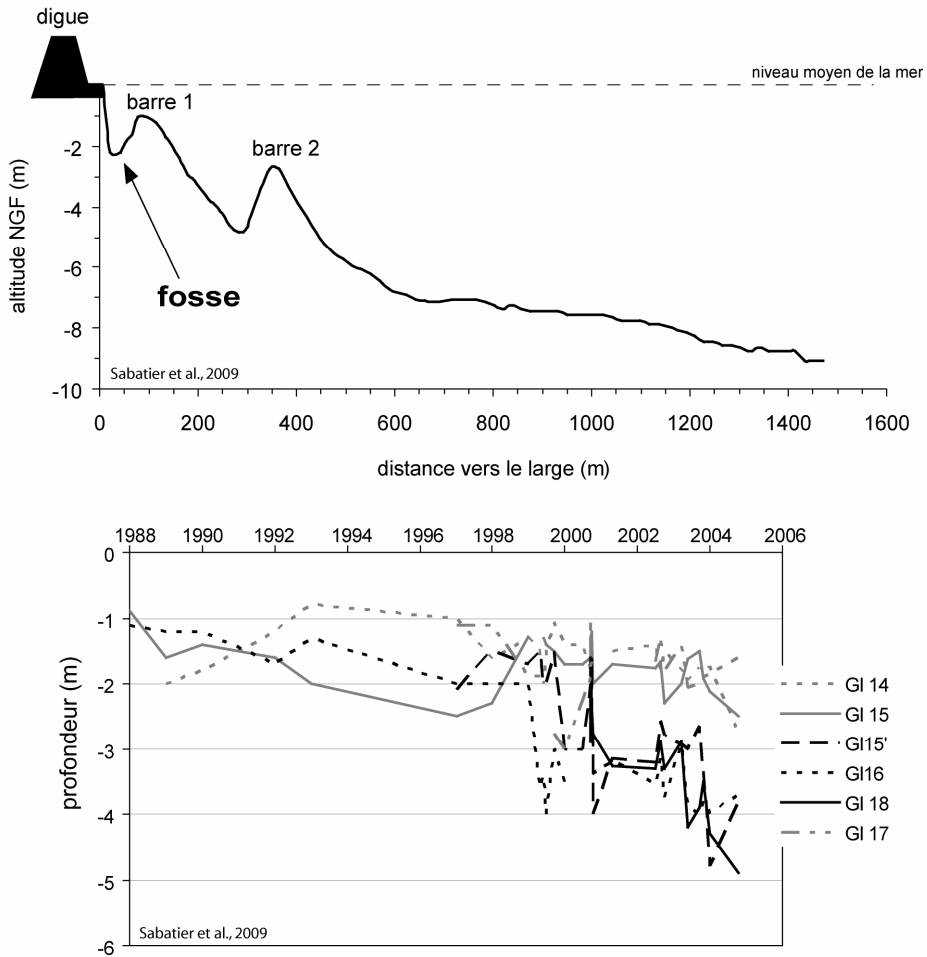


Figure 4 : Profil bathymétrique de (en haut) et évolution de la profondeur de la fosse interne depuis 1988 (en bas)

LA PERTURBATION DES DYNAMIQUES NATURELLES

Les bancs de sables parallèles au rivage (barres d'avant côte) constituent des stocks sableux qui renseignent indirectement sur l'état sédimentaire d'un secteur. Nous avons donc d'abord évalué le bilan sédimentaire moyen des barres entre 2000 et 2004 (une comparaison avec les profils antérieurs n'était pas possible du fait des relevés inadaptés entre 1988 et 1998). Ensuite, nous avons analysé les capacités naturelles des profils à se recharger en sables durant les périodes de beau temps afin de déterminer si la digue perturbe ce mécanisme naturel.

La morphologie des profils bathymétriques évolue longitudinalement (fig. 5). Elle passe de deux barres relativement bien individualisées à l'Est (GI14, GI15), à trois barres au droit (GI18 et GI16) et à l'Ouest de la digue de Véran (GI17). Le bilan sédimentaire des deux premières barres (1 et 2) évolue de façon similaire (fig.5). On observe une perte principalement sur la partie Ouest de la digue ainsi que sur la partie médiane et un gain pour la partie Est (GI15 et GI14).

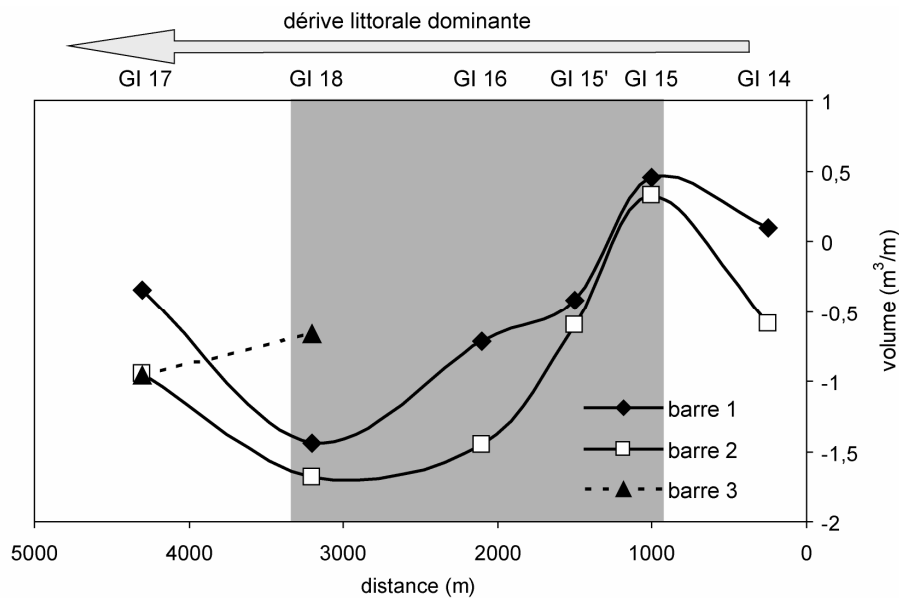


Fig 5 : Evolution du bilan sédimentaire des barres d'avant côte

Sur tous les profils, la barre 2 (la barre au large) montre les plus forts taux d'érosion. Le bilan sédimentaire des deux premières barres affiche aussi une tendance à l'érosion dans le sens de la dérive littorale dominante. La troisième barre (b3) en GI17 et GI18 montre également des pertes importantes qui dépassent celles de la barre 2 en GI17 (fig 5).

Le rechargement naturel des plages durant les périodes de beau temps (fig. 6) est en majorité positif sur les lignes en marges ou en tout début de l'ouvrage en enrochements (ou exceptionnellement négatifs entre janvier-août 2004 au niveau de GI17). En revanche, sur les profils directement au droit de la digue, le ré engraissement est inexistant et les bilans sédimentaires sont à chaque fois déficitaires. La digue de Véran réduit effectivement la reconstitution de la plage mais à des degrés divers selon les périodes et les profils.

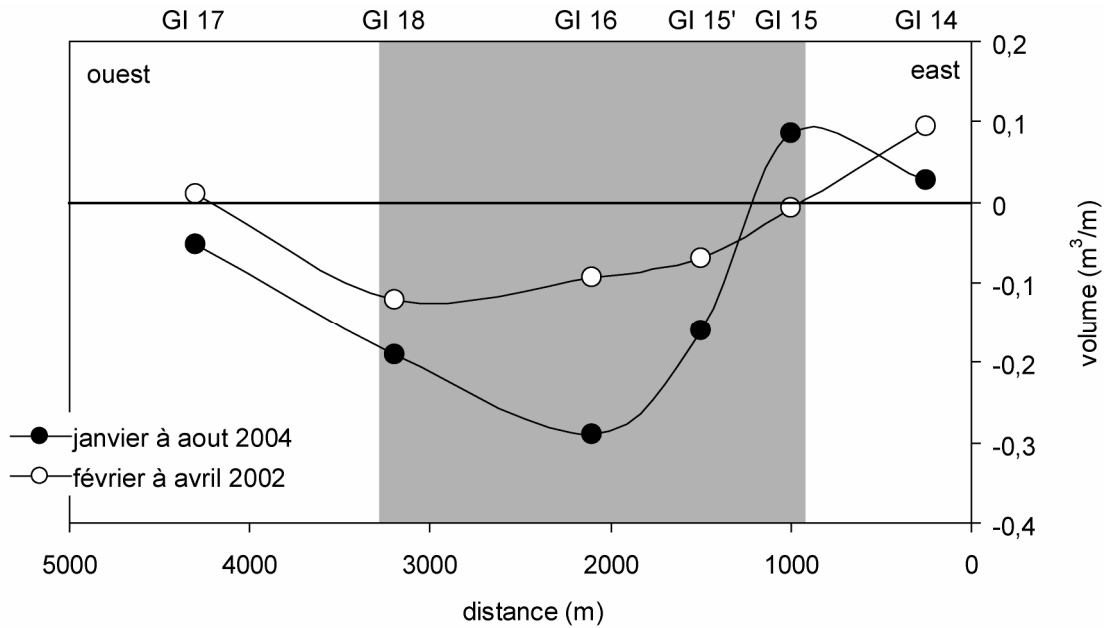


Figure 6 : Intensité de la reconstruction de la plage par lignes de profils

CE QU'IL FAUT RETENIR

Nos mesures de terrains (profils bathymétriques) mettent en évidence que les digues frontales augmentent significativement l'érosion sous marine. Cette érosion est observée par l'augmentation des pertes sédimentaires, un approfondissement de la fosse interne au pied de l'ouvrage, un dégraissement des barres d'avant côte et un ralentissement, voire l'absence des processus de régénération naturelle des plages.

Par conséquent, la mise en place de ces digues doit être réalisée avec le plus grand soin et en connaissant leurs effets secondaires qui mettent en péril, à long terme, la stabilité des ouvrages. 10 ans après sa re-construction, cette digue qui n'est plus entretenue aujourd'hui menace de s'effondrer. Ce processus a localement débuté.

Fiche thématique 4.3 Erosion sous-marine devant les Saintes-Maries-de-la-Mer

Responsable : F. Sabatier, CEREGE

INTRODUCTION

Le littoral des Saintes Maries de la Mer est soumis à une érosion pluriséculaire naturelle historique. Les vitesses de recul du rivage étaient très rapides, comprises entre 2 et 9 /an avant la construction des ouvrages en enrochements dont une synthèse est proposée en figure 1. Ces ouvrages ont bloqué très tôt le recul du rivage (dès 1940 au droit des Arènes) et des interrogations subsistent sur l'évolution des fonds au droit de la ville dont nous avons analysé le comportement à partir d'une comparaison de relevés bathymétriques (1872, 1895, 1974, 1980, 2005). L'impact des modifications des fonds sur la force de la houle a aussi été investigué.

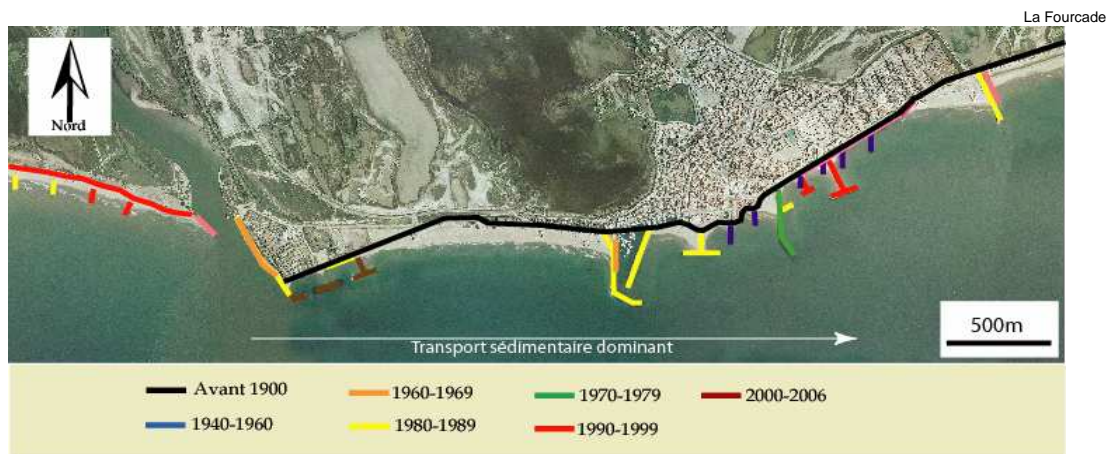


Figure 1: localisation et période de création des ouvrages de défense (fond :ortho photographie IGN, 2003)

L'ÉROSION DES FONDS

D'une forme globalement curviligne à la fin du 19^{ème} siècle, les isobathes devant les Saintes-Maries-de-la-Mer évoluent progressivement vers une forme linéaire entre 1872 et 2005 traduisant une érosion du prodelta du Petit Rhône (fig. 2 et 4). Ces modifications s'accompagnent d'une évolution importante des volumes sédimentaires entre 0 et -13 m. Le bilan sédimentaire global net entre 1872 et 2005 est négatif, de l'ordre de 112 millions de m³ soit des valeurs d'érosion proche de 800.000 m³.an⁻¹ ($-0,01 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{an}^{-1}$)(fig. 2). Les secteurs accusant les pertes en volume les plus importantes se localisent essentiellement au niveau de l'embouchure du Petit Rhône là où le recul du rivage est le plus marqué. Le déficit s'élève ici à plus de 0,06 m³.an⁻¹ traduisant une érosion verticale supérieure à 5 m. Un deuxième secteur en fort déficit sédimentaire se situe en face des Saintes-Maries-de-la-Mer, au niveau de l'isobathe -10 m actuelle : ici les valeurs d'érosion relatives s'élèvent à 0.05 m³.an⁻¹ pour un enfouissement du profil d'environ 5m. Enfin la troisième zone préférentielle d'érosion se superpose globalement à l'isobathe -5m actuelle (isobathe de 2005), où les taux d'érosions s'élèvent à 0,04 m³.an⁻¹, pour une incision verticale d'environ 4 m.

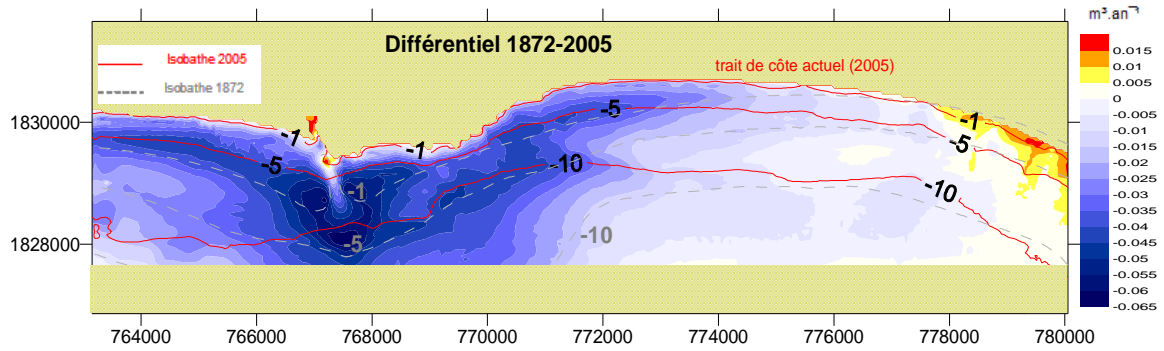


Figure 2: Evolution bathymétriques entre 1872 et 2005

Dans le détail, avec une érosion s'élevant à un peu plus de 500.000 m³.an⁻¹, soit des valeurs relatives de 0,02 m³/m².an⁻¹, les intervalles 1872-1895 et 1895-1974 connaissent les érosions les moins fortes (fig. 3 et 4). En revanche, la période 1974-1980, avec des pertes estimées à 2,5 millions m³.an⁻¹, soit 0,07 m³.m².an⁻¹, se montre particulièrement érosive. Enfin l'intervalle 1980-2005, présente une érosion moyenne de 1,2 millions m³.an⁻¹ soit -0,035 m³.m².an⁻¹

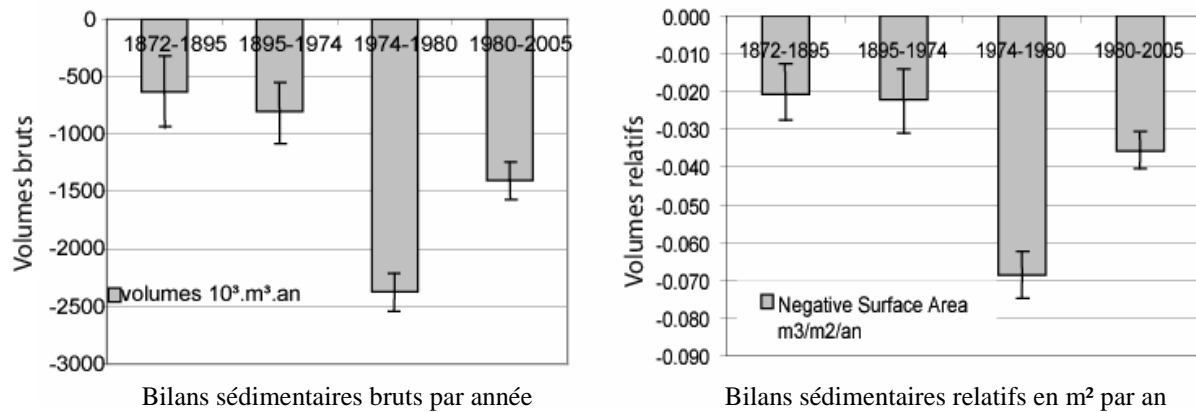


Figure 3: bilan sédimentaire par période

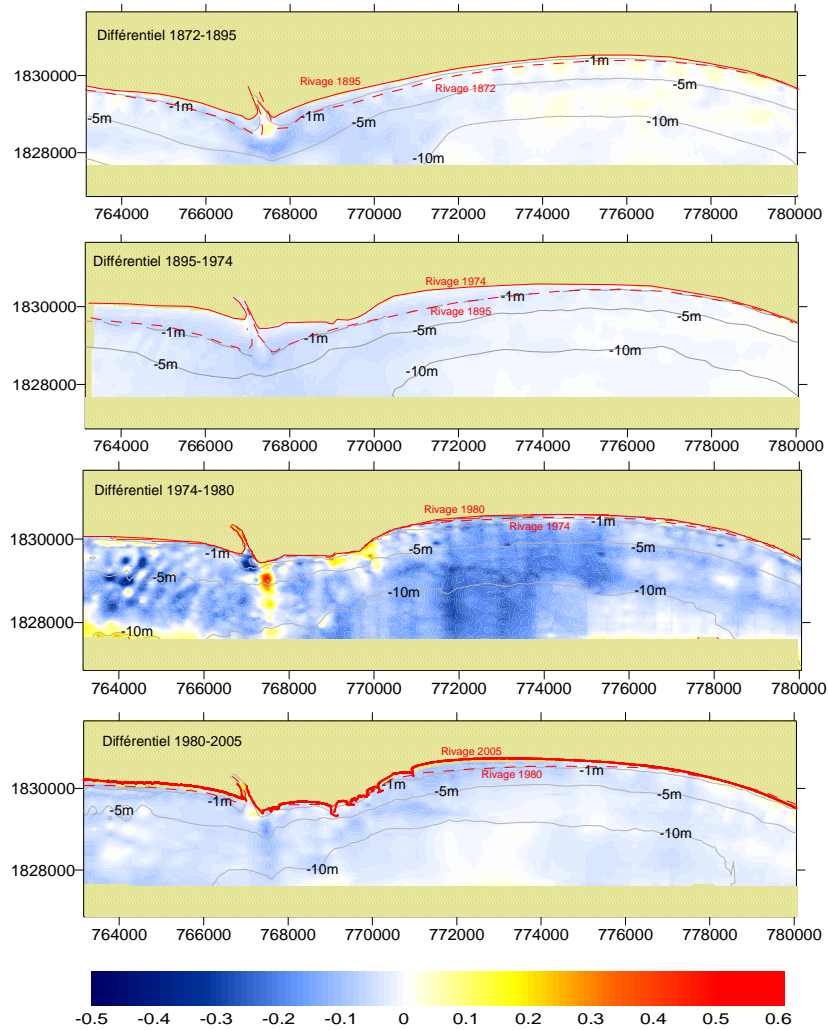


Figure 4. Evolutions bathymétriques annuelles

DES PENTES SOUS-MARINES QUI S'ACCENTUENT DEVANT LE VILLAGE

La comparaison des pentes met en évidence plusieurs phénomènes (fig. 5). Tout d'abord une homogénéité relative des valeurs de pente à la fin du 19^{ème} siècle (1895) qui s'oppose à une forte irrégularité observée entre 1974-1980 et 2005. Les trois derniers relevés montrent en effet l'apparition de deux lignes de fortes pentes. Ce changement morphologique traduit la destruction du lobe prodeltaïque lié à la diminution des apports sédimentaires du Petit Rhône. De plus, surtout à partir de 1977, les pentes les plus fortes progressent vers le Nord, témoignant d'une translation horizontale du système plage-avant côte. Cette translation est cependant bloquée par les ouvrages en enrochement qui stabilisent le rivage des Saintes-Maries-de-la-Mer. Il est probable que l'on observe ici les effets des enrochements qui augmentent la réflexion de la houle causée par les tempêtes de SE.

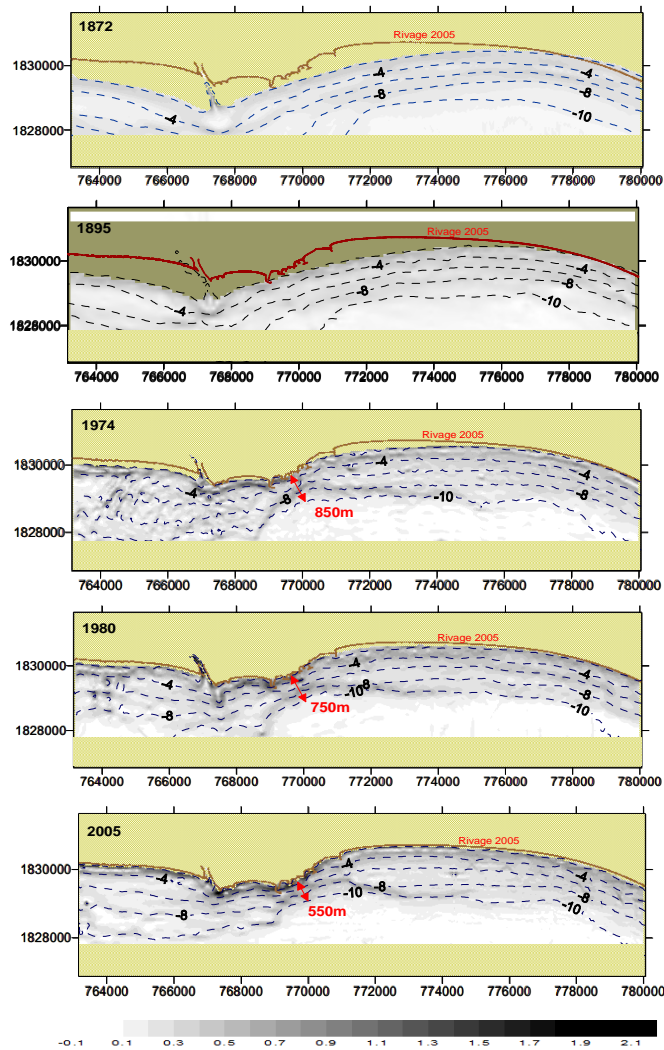


Figure 5: Représentation des pentes et de la bathymétrie (pointillés)

Enfin, une zone en arc de cercle qui migre lentement vers le NW (flèche rouge sur la fig.5) se démarque plus au large, autour de l'isobathe -8 m. La distance de cet arc de fortes pentes (en gris foncé) par rapport à la côte, passe en effet de 850 , 750 et 550 m respectivement en 1974, 1980 et 2005.

L'analyse de l'évolution de la propagation de la houle depuis la construction des aménagements massifs (période 1974 à 2005), montre globalement des concordances avec les résultats précédents puisque les valeurs les plus fortes se localisent au niveau des érosions les plus importantes (fig. 6). Dans le détail, les hauteurs de houles augmentent sur les parties limitrophes au village, au niveau des secteurs dépourvus d'enrochements tandis que devant les Saintes-Maries-de-la-Mer, peu de modifications sont observées. Ces résultats qui a priori peuvent paraître surprenant s'expliquent par les contraintes du modèle. L'augmentation des valeurs de la houle est préférentiellement réalisée entre le rivage et -5 m, soit dans la zone du déferlement car cette zone s'incise significativement. Sur les plages en recul libre (rive droite du Petit Rhône et plages à l'Est de la Fourcade), l'érosion des petits fonds est importante tandis que devant le village, où la bathymétrie devant les ouvrages était déjà inférieure à -5 m en 1974, l'incision du profil de plage n'induit pas de modifications significatives de la houle. De plus, le maillage du modèle (200x200m), contrôlé par la densité de mesures de sondes in

situ, n'est pas suffisant pour simuler correctement la force des vagues dans les petites profondeurs (<5-6 m).

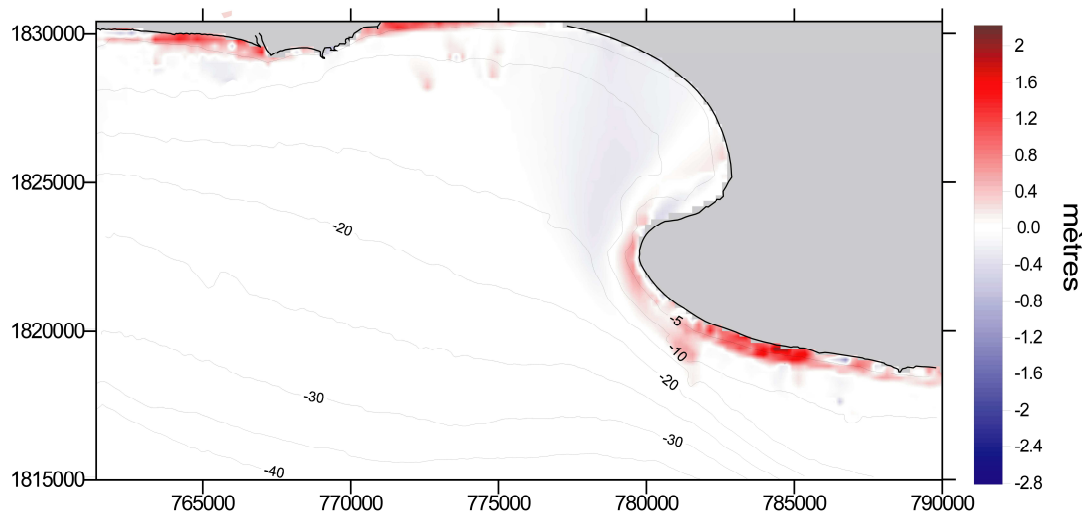


Figure 6. Evolution de la hauteur de houle entre 1974 et 2005. Cet exemple représente l'évolution d'une houle significative de 4m et de période 8 secondes (valeur en entrée du modèle) propagée à partir du modèle spectral STWAVE.

CE QU'IL FAUT RETENIR

Le rivage au niveau du village des Saintes-Maries-de-la-Mer est stabilisé par des structures en enrochements (digues, épis, brise-lames). Cependant, l'érosion sous-marine naturelle continue, elle est plus forte depuis que des aménagements lourds ont été déposés (entre 1974 et 2005), alors que durant le siècle précédent (entre 1872 et 1974), les valeurs d'érosion sont moins élevées. A ce stade il n'est pas possible de quantifier précisément et distinctivement le rôle des enrochements ou de la diminution des apports sédimentaires du Petit Rhône sur l'érosion du secteur.

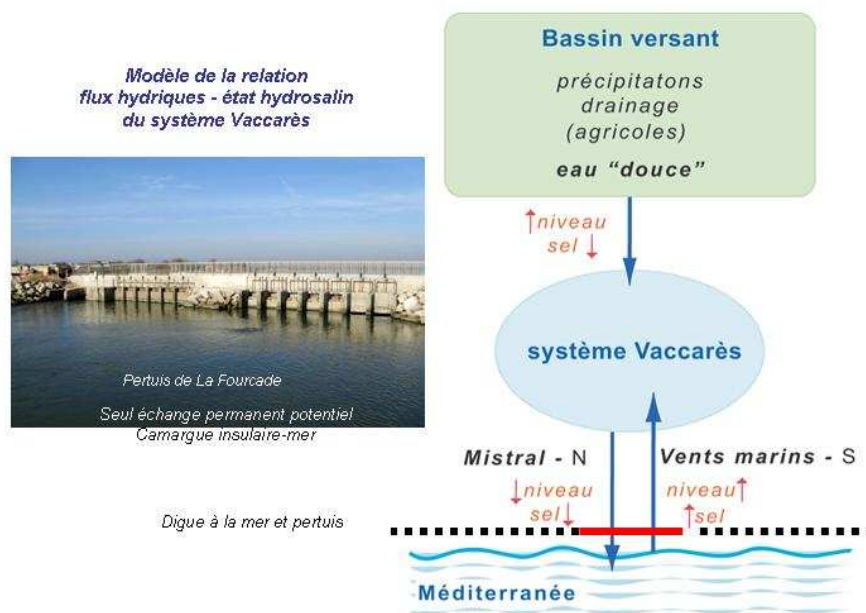
Fiche thématique 5.1.1 : Gestion de l'eau dans l'Île de Camargue et contraintes mer-fleuve-climat : la Commission exécutive de l'eau (CEDE)

Responsable : **Alain Dervieux, DESMID (UMR CNRS ESPACE Arles-Université de la Méditerranée)**

CONTEXTE GENERAL

Quelle situation, quels enjeux motivent ce projet ?

L'élévation du niveau marin et les flux mal maîtrisés du drainage dans l'Île, entraînent de plus en plus de difficultés pour sortir l'eau des grands étangs de l'Île de Camargue vers la mer. Trop d'eau : risque d'inondation de la Camargue insulaire, problèmes d'écoulage des terres agricoles. Pas assez d'eau : trop de sel, limitation des flux piscicoles, difficultés pour la pêche. Les milieux « naturels » de la Réserve Nationale de Camargue (RNC) sont affectés. La gestion des 13 vannes du seul pertuis opérationnel permanent (La Fourcade proche des Saintes-Maries-de-la-Mer), assurée par la CEDE (Commission exécutive de l'eau), pose les enjeux de la gestion globale de l'eau à l'échelle du territoire avec ces contraintes. La digue à la mer est une protection, elle freine aussi les sorties d'eau vers la mer.



La CEDE regroupe des acteurs de l'eau. C'est une commission informelle : elle ne dépend directement d'aucun organisme. Elle est seulement rattachée au Comité de delta (Dervieux, 2005).

OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

Positionnement, rôle et légitimité de la CEDE. La situer par rapport aux enjeux de gestion des eaux et du littoral.

QUELQUES ELEMENTS DE METHODOLOGIE (ET EVENTUELLES DIFFICULTES RENCONTREES)

- Enquêtes semi directives par entretiens : 18 entretiens, complétés par d'autres enquêtes (EID Méditerranée et PNRC, 2006) et recherches antérieures (Dervieux, 2005 et Dervieux *et al.*, 2006).

- Observation participante dans les divers forums de l'eau. Depuis juin 2006 (1^e réunion de préparation de la nouvelle charte du PNRC) : 15 ateliers « charte » ; 30 réunions : CEDE, CGO (Commission gestion de l'eau et des milieux du Parc), dont 5 autres (Syndicat Mixte de Gestion des Associations Syndicales du Pays d'Arles et Syndicat mixte de gestion des digues du Rhône et de la Digue à la mer).

RESULTATS OBTENUS

Voir en annexe Dervieux *et al.*, 2006 (mise en ligne été 2007).

Actualisation :

La CEDE peut se situer en marge des conflits qui ont agité le Parc de 2002 à 2007 (cf. Dervieux, 2005), mais persistance de conflits internes entre et avec les pêcheurs sur les ouvertures/fermetures des vannes de la Fourcade. Compréhension partagée par un nombre restreint de participants de la CEDE, impliqués pour la plupart dans la CGO du Parc (cf. fiche 5.1.2).

La question de la gouvernance se pose pour mettre en place une gestion adaptée aux contraintes sans « forçages » sociétaux (risque de nouveaux conflits). Les acteurs locaux (élus, habitants, organismes multiples...) ne semblent pas toujours faire preuve de cohésion face à des propositions visant à la mise en place des politiques publiques adaptées à l'évolution du trait de côte tenant compte du développement soutenable, respectueuses au mieux des intérêts de l'ensemble des habitants (protection nécessaire).

Voir aussi propositions d'actions : fiche 2 de ce volet 5.1 de l'action 5.

Synthèse des évènements marquants survenus depuis juin 2006 :

- La future Charte du Parc Naturel Régional de Camargue (PNRC). Juin 2006, 1^e concertation du PNRC avec acteurs et habitants (préparation de la charte) :
 - nombreux ateliers collectif Parc-acteurs-habitants,
 - l'eau devient un axe structurant du fonctionnement du territoire (PNRC, 2009),
 - intensification du travail sur la gestion globale de l'eau (cf. fiche 2 de ce volet)
 Les acteurs camarguais préfèrent ne pas avoir (pour l'instant ?) de SAGE : cette situation pose clairement la question de la gouvernance de la gestion de l'eau et met l'accent sur le rôle majeur du couple CEDE-CGO.
- Le Plan d'action de la commission exécutive de l'eau : orientations pour la gestion de l'eau dans l'Île (CEDE, déc. 2006), évolution de la gestion de l'eau au travers du lien amont-aval-pertuis.
- Réhabilitation du Pertuis de la Comtesse : (situé en limite Est de la RNC). Les ateliers et réunions cités ci-dessus ont permis le lancement de la réfection des vannages non fonctionnel depuis 40 ans. But : augmenter la capacité d'évacuation à la mer. Fonction secondaire : échanges biologiques mer/étang. Travaux réalisés par le SYMADREM dans le cadre du Plan Rhône. Action qui revêt un caractère symbolique pour les camarguais (forte valeur identitaire pour les plus anciens : le Parc a été créé pour défendre la Camargue menacée.)
- Les fortes pluies de l'hiver 2008-2009 et surtout de février 2009 : les étangs (+ 0,50 m NGF) menacent de déborder sur les terres riveraines. Le risque d'inondation est écarté grâce à un Mistral (vent de Nord) violent permettant d'abaisser les niveaux d'eau. Cette situation favorable n'est pas forcément reproductible : si une nouvelle perturbation intervient au lieu du Mistral, les équipements actuels seront insuffisants pour évacuer l'eau en excès. Cependant, cette crise semble avoir accéléré la prise de conscience des décideurs de la limite de capacité de gestion hydraulique du système. Il est encore trop tôt pour vérifier si le résultat est une prise de conscience des conséquences de l'élévation du niveau

de la mer sur ces contraintes de gestion. Cela aura permis toutefois, en termes opérationnels, d'accélérer la réfection du pertuis de la Comtesse.

Inondations de 1993 et 94 : prise de conscience de la nécessaire amélioration de la gestion des eaux dans l'Île (Dervieux, 2005). Mais le lien entre aléas, élévation du niveau de la mer, surcotes concomitantes très défavorables en cas de tempête (vents de Sud), n'est pas cependant bien intégré : le risque littoral est encore mal perçu malgré les événements de février 2009 (et auparavant ceux de 2003 à Arles, où seul le risque fluvial a été bien appréhendé alors que la surcote marine, importante, aurait pu avoir des conséquences aggravantes). Que faire pour améliorer la situation en cas de crise ? Que faire aussi en termes de gestion courante (et préventive) alors que la décote mer-étangs est le plus souvent défavorable à l'évacuation à la mer pendant la période précédent les pluies d'automne ?

Question de soutenabilité : vas-t-on vers toujours plus d'aménagements en dur et la poursuite de la logique de poldérisation, ou pourras-t-on aussi tenter de favoriser, où cela est possible, une adaptation « plus douce » à l'élévation du niveau de la mer *i.e.* peut-on envisager de redonner un espace de liberté à la mer le long du littoral camarguais (EID Méditerranée et PNRC, 2006) ? Il semble que l'ensemble des acteurs camarguais ne soit pas prêt à combiner ces modes d'interventions.

Ce travail d'analyse de la gestion de l'eau en relation notamment avec le risque littoral, se poursuit à travers 2 programmes (CAMPLAN, Eaux et territoires, en cours ; CAMADAPT, Liteau 3, qui débutera d'ici la fin de l'année).

IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS, REALISATIONS PRATIQUES, VALORISATION

- Implications pratiques :

La CEDE fonctionne en relation avec CGO : plusieurs membres font partie des 2 commissions dont l'une est plus technique, l'autre plus politique (peut porter les projets devant le Comité syndical du Parc et le Conseil de Parc). Ce lien se précise actuellement. Il pourrait aider à mieux situer le risque littoral dans la culture camarguaise et peut-être favoriser la prise en compte du développement durable et d'approfondir la notion de « redonner un espace de liberté à la mer ». Voir fiche 2 du volet 5.1.

- Recommandations et limites éventuelles :

Comment pérenniser la CEDE dans son rôle en maintenant son caractère informel favorable aux échanges et aux apprentissages mutuels (cf. fiche 5.1.2, fiches 5.2.1 et 5.2.2) ? Quel lien avec le Parc, qui semble l'organisme le plus à même de rassembler autour d'une gestion globale de l'eau, si de nouvelles phases de conflits devaient apparaître (*i.e.* comme 2002-2007) ?

Dans la hiérarchie des enjeux, celui de la conservation de la nature occupe une place importante (avant la pêche qui lui est liée) notamment en termes d'intégration économique soutenable (lien environnement-tourisme). Il y a beaucoup d'ambiguïtés sur le rôle de l'apport considérable d'eau du Rhône, qui modifie les paysages et les habitats (Aznar et al., 2003 ; Aznar et al., 2009). Ainsi, l'apport d'eau par la riziculture constitue une ressource utilisée par toutes les activités ; la permanence de l'eau surtout dans les grands étangs, visible par tous, fait considérer comme état naturel ce qui ne l'est pas (cf. Dervieux, sous presse) : cette représentation sociale est aujourd'hui très présente dans les forums de l'eau y compris chez les anciens.

- Réalisations pratiques et valorisation :

Réfection du pertuis de la Comtesse (2^e pertuis à la mer)

Accompagnement à la création d'une commission équivalente à la CEDE dans le Grand Plan du Bourg (à l'étude dans le cadre de CAMPLAN).

PARTENARIATS MIS EN PLACE, PROJÉTÉS, ENVISAGÉS

Implication dans la CEDE et la CGO du Parc. Partenariat courant avec les organismes de gestion de l'eau en Camargue.

Autres projets de recherches en cours et prévus : CAMPLAN (Eaux et Territoires) et CAMADAPT (Liteau 3).

POUR EN SAVOIR PLUS (QUELQUES RÉFÉRENCES)

Aznar, J.C., Dervieux, A. et Grillas, P. 2009. Évolution de la végétation aquatique et gestion de l'eau en Camargue entre 1980 et 2000, in « *Le golfe du Lion* » (éd. A. Monaco, W. Ludwig, M. Provansal, B. Picon) : 123-134.

Commission exécutive de l'eau, 2006. « *La Commission exécutive de l'eau : évolution et perspective* », ouvrage collectif, (http://www.parc-camargue.fr/Francais/download.php?categorie_id=11).

Dervieux, A., 2005. La difficile gestion globale de l'eau en Camargue (France) : le Contrat de delta. Vertigo. Vol 6, n°3. <http://vertigo.revues.org/index2410.html>

Dervieux, A., Jolly, G. et Allouche, A., 2006. Gestion de l'eau et projet de territoire : vers une **gestion intégrée du delta du Rhône**. Vertigo. Vol. 7, n° 3. <http://vertigo.revues.org/index1422.html>

Parc Naturel Régional de Camargue, 2009. *Ambition 1* : « *Gérer le complexe deltaïque en intégrant les impacts du changement climatique* ». in Charte, Objectif 2022, Vol. 1 (http://www.parc-camargue.fr/download/Rapport_avant_projet_charte.pdf).

EID Méditerranée et Parc Naturel Régional de Camargue, 2006, Étude de définition des enjeux de protection du littoral sableux. Rapport, 95 p.

Fiche thématique 5.1.2 : Gestion de l'eau dans l'Île de Camargue et contraintes mer-fleuve-climat : de possibles alternatives à la gestion actuelle

Responsable : **Alain Dervieux, DESMID (UMR CNRS ESPACE Arles-Université de la Méditerranée)**

Cette 2^e fiche est le résultat des réflexions et concertations pour une gestion de l'eau adaptée aux besoins actuels, en particulier ceux de la préparation de la nouvelle charte du Parc de Camargue (révisable tous les 12 ans). Elle synthétise un exemple de collaboration et de mutualisation des connaissances (vernaculaires, scientifiques, empiriques) pour un projet de territoire. Ces propositions devraient être adaptées au fil du temps selon les besoins de protection des biens et des personnes, des activités humaines et des usages. Les camarguais ont une responsabilité importante dans le devenir de leur territoire, et ce n'est pas seulement en raison de cette nature si remarquable que l'on finit par oublier son caractère artificialisé.

Si l'élévation du niveau de la mer se poursuit, compte tenu de l'incertitude sur sa vitesse et ses modalités, notamment sur la possibilité d'une augmentation significative de la fréquence des niveaux extrêmes et fortes houles augmentant la vulnérabilité de la digue à la mer (cf. fiche 1.1 et 4.3), il faudra bien trouver une solution pour gérer les contraintes. Comment et quelles interventions – que l'on ne pourra éviter – seront choisies et hiérarchisées ? Anticiper des risques qui devraient survenir devrait être une nécessité. Ce qui suit est une orientation possible qui fédère les principaux participants aux Commission exécutive de l'eau (CEDE) et Commission Gestion de l'eau et des milieux (CGO) et rassemble donc les acteurs de l'eau majeurs.

Le texte présenté ici¹ est pour partie le résumé d'un travail collectif pour la réécriture de l'ambition 1 de la pré-charte : « Gérer le complexe deltaïque en intégrant les impacts du changement climatique ». Le texte initial est signé par Alain Dervieux (DESMID), Bernard Pommet (DDAF), Éric Coulet (RNC-SNPN), Philippe Chauvelon (TDV), Stéphane Marche (PNRC), Philippe Pace (SMGAS) et Yvon Vanetti (Conseil de Parc, professionnel de la pêche). Il intègre les travaux des ateliers de préparation de la future charte et des réflexions de la CEDE et la CGO. Des apports personnels récents interviennent en fin de texte. L'ensemble constitue un prolongement de la fiche n°1 sous une forme prospective.

CONTEXTE GENERAL ET OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

La charte du Parc est édictée pour 12 ans pour un territoire soumis à des contraintes s'exerçant sur une durée beaucoup plus large par des phénomènes extérieurs à la Camargue. La plus contraignante dans ce delta est le changement global et son impact sur une plus grande irrégularité climatique au niveau régional, déjà ressentie localement (inondation, crues du fleuve, sécheresse). La population locale ne s'approprie qu'insuffisamment ses effets en termes d'élévation du niveau de la mer et ses conséquences.

Il est donc nécessaire de faire évoluer la gestion de l'eau dans le delta, dépendante des aménagements réalisés depuis plus d'un siècle, pour s'adapter à ces contraintes, donner le temps de l'adaptation à la population, élus, camarguais ou acteurs du territoire et ajuster les réponses techniques aux changements.

Il faut rappeler le lien permanent entre niveau local de la gestion de l'eau et son expression globale. Les insuffisances constatées en plusieurs des points stratégiques des outils de gestion (pompes, pertuis ...) posent le problème de l'utilisation de la ressource et de sa maîtrise liée à un effet dominos : les problèmes techniques non résolus en amont pèsent de plus en plus sur la stratégie de gestion aval et réciproquement. Ce qui est vrai pour la gestion technique de l'eau l'est aussi pour la dimension sociale de cette gestion, qui reste un paramètre central. L'adhésion des acteurs, usagers, habitants, à un projet de gestion de l'eau adapté aux

¹ Titre original : « Une gestion de l'eau adaptée à l'évolution du territoire du Parc de Camargue dans la perspective du renouvellement de sa Charte », doc. Interne, nov. 2008. Ce groupe de travail a été réuni à l'initiative du président de la CEDE (B. Pommet) et du président de la CGO (moi-même).

nécessités contemporaines est indispensable. Rappelons ici les profonds bouleversements produits dès les années 1950 : apparition d'un nouveau visage de la Camargue résultant d'un usage totalement nouveau de l'eau, rapidement utilisé par l'ensemble des activités du territoire à partir du développement de la riziculture.

RAPPEL DES PRINCIPAUX ENJEUX ET OBJECTIFS :

Inciter les acteurs de l'eau (il ne s'agit pas là seulement d'acteurs locaux, mais aussi des collectivités et grands organismes décisionnels) à acter la nécessité de faire évoluer les pratiques actuelles et favoriser le dialogue permanent pour tendre vers un développement soutenable en respectant :

- 1/ la protection des biens et des personnes : mettre en place des outils nécessaires pour permettre la maîtrise des niveaux d'eau de l'hydrosystème
- 2/ les milieux emblématiques, la flore et la faune des zones de protection centrales en respectant leurs capacités d'adaptation
- 3/ et en intégrant au mieux des usages qui peuvent évoluer (agriculture, pêche, conservation ...) ainsi que les riverains.

DES PRESSIONS SUR LE TERRITOIRE :

Au local, les limites de la gestion actuelle sont déterminées par des variables externes :

- Contraintes des conséquences du changement climatique : élévation continue du niveau de la mer (incertitude sur l'ampleur et la rapidité de ce phénomène dans les prochaines décennies) conjuguées à la subsidence du delta,
- Augmentation de la fréquence et de l'intensité des événements hydroclimatiques extrêmes (ex. : crues, sécheresses...),
- Incertitudes sur le volume des apports d'eau agricoles futurs (i.e. sur l'évolution de la riziculture).

Les variables internes sont surtout liées à l'inadaptation de la maîtrise aval : la gestion de l'eau du système Vaccarès (le système d'étangs et son bassin versant) devient impossible pour la satisfaction simultanée de tous les usages. Les niveaux bas souhaités pour les étangs (objectif sécurité) compte tenu de l'élévation du niveau de la mer, deviennent incompatibles avec la maîtrise de la salinité et le maintien des flux biologiques avec le milieu marin. Une forte salinisation des étangs intervient régulièrement et l'on ne dispose aujourd'hui d'aucun outil efficace pour la modérer quand cela est jugé nécessaire.

DES MOYENS POSSIBLES :

- Nécessité d'augmenter la capacité d'ouverture des pertuis maritimes et la maîtriser est indispensable pour l'évacuation des eaux en cas de besoin (inondation, forte pluie). Cela revient à élargir et rendre opérationnels les 3 pertuis actuels (Fourcade, Rousty, Comtesse).
- Rétablissement du caractère saumâtre des eaux : maîtrise des niveaux, réhabilitation de la variabilité saisonnière spécifique à une zone humide deltaïque méditerranéenne à porter au débat. Peut-on admettre directement de l'eau du fleuve en fonction des besoins, de façon maîtrisée, si possible gravitaire, en utilisant les canaux de drainage ou le réseau d'irrigation moyennant des aménagements.
- Possibilités d'entrées maîtrisées d'eau du fleuve en crue et donc chargée de sédiments. Les modalités et faisabilités devront être discutées et déclinées précisément. Cela pourrait contribuer à compenser (*un peu*) le différentiel d'altitude delta-mer dû à la subsidence et à l'élévation du niveau marin.
- S'assurer du développement et de la pérennité du réseau de mesure (niveaux, débits, paramètres climatiques, qualité physico-chimique des milieux aquatiques) : informations quantitatives indispensables pour évaluer l'état du système et la mise en œuvre de règles de gestion hydraulique et d'adaptation à l'élévation du niveau de la mer.

COMMENT :

Ce projet ambitieux nécessite un phasage et une adaptation aux circonstances (climatiques, économiques...) avec en préalable la définition d'une gouvernance assurant la maîtrise d'une nouvelle hydraulique camarguaise, qui ne pourra jamais être totale. Ce phasage pourrait se décliner au travers d'un plan d'action à élaborer rapidement tenant compte des exigences suivantes :

- Pérenniser et surtout compléter le réseau de mesures existant,
- élargir les pertuis à la mer,
- améliorer l'efficacité du ressuyage en cas d'inondation (fleuve, pluies abondantes...),
- réhabiliter les pompes d'exhaure au Rhône afin qu'elles puissent fonctionner malgré de fortes crues (ce n'est pas le cas actuellement),
- étudier à terme les besoins en protection rapprochée des zones exposées aux risques d'inondations, surverses ou surcotes marines (zones urbanisées comme les Saintes-Maries-de-la-Mer, refuges pour l'élevage...),
- envisager une alimentation directe en eau du fleuve : étudier la faisabilité en gravitaire ou gravitaire aidé par pompage (par le système d'irrigation, voire transit hivernal par les rizières) et des aménagements nécessaires...

Les crues et inondations du Rhône ont provoqué la mise en place du Plan Rhône pour prendre en compte la sécurité des biens et des personnes dans le delta. Avec son volet « Ressources et biodiversité », il devrait participer au financement de la mise à niveau du réseau de mesures (hydrométrie, qualité des eaux). Il constitue une aide précieuse pour faire évoluer la gestion de l'eau, mais ne s'attache pas au problème littoral.

Il me semble nécessaire aujourd'hui d'étudier l'éventuel besoin de stations de pompage capable d'évacuer les eaux en excès vers la mer en cas de surcotes marines, de plus en plus fréquentes. La mise en action de multiples pompes mobiles par la profession agricole est envisagée. Elle nécessitera de définir des points d'installations adaptés pour le refoulement des eaux vers le fleuve, mais il s'agira aussi d'évaluer auparavant l'efficacité d'une telle organisation. Ce choix pourrait constituer à minima une solution d'attente.

Enfin, pour la qualité des eaux hors la question de la salinité, le problème des flux de polluants dans l'hydrosystème en provenance du bassin versant agricole est insuffisamment mis en avant et pourrait poser problème à moyen terme. C'est un sujet sensible et porteur de conflits. On peut y voir là une raison pour qu'il ne soit guère abordé dans les instances de discussion et de gouvernance de l'eau du territoire. Mais c'est aussi parce que les outils dont on dispose sur le territoire sont insuffisants pour faire avancer cette problématique en lien direct avec une agriculture toujours puissante. Les organes locaux de gestion de l'eau et le Parc ne peuvent à eux seuls faire évoluer des pratiques préjudiciables à terme au territoire dont le tourisme et les loisirs sont aujourd'hui une composante majeure.

Il apparaît donc enfin qu'il est indispensable de poursuivre le travail engagé avec la population à l'occasion de la préparation de la pré-charte du Parc : la nécessité de prise en compte du risque littoral doit être en effet intégrée par la population et ses représentants, par l'ensemble des acteurs locaux.

Fiche thématique 5.2.1 : Représentations systémiques individuelles et apprentissages au sein de la Commission Exécutive de l'Eau

Responsable : Raphaël Mathevet CNRS CEFE – Montpellier

Action 5.2 - Gestion concertée en zone humide littorale: approche par la modélisation d'accompagnement.

CONTEXTE GENERAL

Plusieurs approches ont été développées ces dernières années pour favoriser la gestion collective des écosystèmes. La résolution de conflits liés à la gestion des ressources naturelles renouvelables est de plus en plus menée par la médiation, l'apprentissage ou les approches participatives. Beaucoup d'études relatives aux conflits de gestion de l'eau considèrent qu'il s'agit avant tout d'un problème de coordination multi-acteurs. D'autres considèrent que les principaux enjeux sont davantage un problème de dialogue, de dispositif de concertation permettant de partager la pluralité des points de vue sur le fonctionnement hydraulique du système et d'apprendre collectivement sur ce dernier. Le collectif de chercheurs, travaillant sur la modélisation d'accompagnement, propose de s'appuyer sur des outils de simulation et de mise en situation pour aider les parties prenantes à réfléchir collectivement à cette gestion (Antona et al., 2005 ; Collectif ComMod, 2006; Mathevet et al., 2007). Dans notre approche nous considérons l'Ile de Camargue comme un système écologique et social (SES) complexe. Il s'agit de comprendre l'organisation du SES et d'explicitier les interactions qui président à sa dynamique. Pour cela, l'objectif est de définir et mettre en œuvre un dispositif stimulant l'interaction entre les différents porteurs de connaissances sur le SES, qu'ils soient chercheurs ou acteurs locaux, au moyen de différents outils, notamment le jeu de rôles et les modèles de simulation multi-agents.

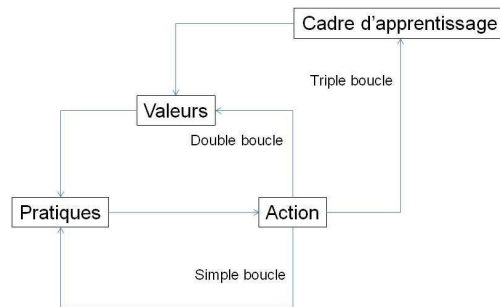
OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

Depuis 1996, les principaux représentants des acteurs de la gestion de l'eau ont pris l'habitude de se retrouver dans une commission informelle autour du Parc Naturel Régional de Camargue appelée la Commission Exécutive de l'Eau (CEDE). Cette commission a pour principale mission la mise en place d'une gestion hydraulique concertée de l'Ile de Camargue, des étangs centraux et inférieurs (Dervieux et al., 2006). Les participants de cette commission se rencontrent régulièrement selon l'évolution du contexte (de 6 à plus de 12 fois par an) afin d'échanger sur l'état hydraulique de la Camargue et d'instaurer un dialogue entre les principaux usagers de l'eau. Ce collectif propose des actions pour améliorer la gestion des conflits autour des différents usages de l'eau. Dans ce contexte, nous avons cherché à construire une approche, des outils afin de contribuer à animer la réflexion des membres de la CEDE en étudiant les représentations que chacun a de la gestion de l'eau dans l'Ile de Camargue. Nous nous sommes interrogés pour savoir si l'adhésion depuis de nombreuses années à une telle commission entraîne, grâce au dialogue et aux interactions entre ses participants, une modification de cette représentation. Nous avons cherché si cette modification est issue d'un apprentissage collectif, conséquence d'un partage des représentations de chaque acteur et si elle permet d'aboutir à une vision partagée de la gestion de l'eau dans l'Ile de Camargue.

Ainsi si la Commission Exécutive de l'Eau est une « organisation apprenante » au sens d'Argyris et Schön (1996), trois hypothèses pouvaient être testées:

- (1) les membres de la CEDE partagent une représentation du système de gestion de l'eau de l'Ile de Camargue ;
- (2) cette vision partagée est différente de celle portée par des acteurs locaux qui ne participent pas à la CEDE ;
- (3) un exercice collectif de co-construction permet de produire un modèle conceptuel plus riche que les modèles individuels des membres de la CEDE en raison du dispositif de partage de connaissance et de points de vue.

Pour Argyris et Schön une organisation apprenante est une organisation qui développe des processus et des stratégies d'apprentissage. Ce dernier induit la détection des erreurs et leur correction. Les objectifs, les moyens, les règles sont plus opérationnalisés que questionnés. On parle alors d'apprentissage en simple boucle. L'alternative est une remise en cause des variables, normes et valeurs qui conduisent les pratiques et les objectifs, par une analyse critique. On parle alors d'apprentissage en double boucle. Enfin, le changement de cadre d'apprentissage traduit un apprentissage dit en triple boucle (cf. figure ci-dessous).



Adapté d'Argyris et Schön, 1996

Les séances collectives avec des membres de la CEDE avaient également pour objectif de co-construire une représentation partagée de la gestion de l'eau sous la forme d'un modèle conceptuel et ainsi de poser les bases du développement d'un simulateur informatique du système. Cet outil de simulation est destiné à être utilisé dans le cadre de séances de jeux de rôles, pour tester des scénarios de politiques publiques et réfléchir aux interactions entre les différents usages de l'eau dans l'Ile de Camargue (cf. Fiche 5.2.2).

QUELQUES ELEMENTS DE METHODOLOGIE (ET EVENTUELLES DIFFICULTES RENCONTREES)

Afin de tester ces hypothèses nous avons développé une approche de modélisation participative. Le collectif ComMod mobilise régulièrement une méthode particulière, la méthode ARDI qui permet de construire collectivement et de représenter sous la forme de modèles conceptuels systémiques, la vision des personnes interrogées sur une problématique posée en leur faisant décliner les acteurs, les ressources, les dynamiques (processus) et les interactions en jeu (Etienne, 2006).

Dans un premier temps, nous avons appliqué individuellement cette méthode avec tous les membres de la CEDE (23) puis avec un échantillon d'individus de même catégories socio-professionnelles et origines géographiques mais ne faisant pas partie de la CEDE (17). Dans

un second temps, nous avons construit collectivement un modèle conceptuel avec une douzaine de membres de la CEDE.

Nous avons utilisé des tests non-paramétriques pour comparer les modèles conceptuels individuels des membres de la CEDE et du second échantillon. Pour comparer les éléments qualitatifs des modèles conceptuels nous avons également utilisé la méthode d'analyse de consensus à l'aide du logiciel UCINET. Cette méthode permet de réaliser un traitement statistique sur le contenu et le partage des mots, des informations et des connaissances entre individus. Cette technique nous a permis de cartographier les relations et leur importance entre les composantes de chaque modèle systémique (acteurs, ressources, processus et interactions) et de caractériser le niveau de consensus au sein de chaque échantillon.

Les méthodes issues de l'analyse des réseaux sociaux ont été également utilisées pour évaluer les aspects structurels des modèles conceptuels ainsi produits par les individus de chaque échantillon. L'analyse des réseaux sociaux fournit une analyse visuelle et mathématique des modèles conceptuels construits par chaque acteur. La centralité d'un nœud (d'un acteur ou d'une interaction donnée) nous éclaire sur les rôles des différentes composantes dans la gestion de l'eau de l'île de Camargue.

RESULTATS OBTENUS

Une représentation partagée de la gestion de l'eau ne semble pas exister pour la totalité des membres de la CEDE. Il semble que les différences observées soient à relier à l'ancienneté de leur participation. Afin de vérifier cela nous avons défini deux sous groupes (> 5 ans de présence et < 5 années). Le groupe le plus ancien (dominé également par des acteurs institutionnels) partage une représentation de la gestion de l'eau distincte du groupe des « nouveaux » membres. Ce qui ne valide donc que partiellement notre première hypothèse relative à l'existence d'un point de vue collectif de la gestion de l'eau au sein des membres de la CEDE.

Les acteurs de l'échantillon « non CEDE » n'ont pas une représentation commune de la gestion de l'eau. Leurs modèles conceptuels sont très sectoriels et très peu développés au-delà de ce qui relève de leur activité respective. Les tests de consensus montrent que les modèles individuels des membres de la CEDE sont différents de ceux de l'échantillon composé de non participants. Ce qui permet de valider notre seconde hypothèse, la vision des individus ne participant pas à la CEDE diffère significativement de celle portée par les membres de cette commission.

La projection des modèles moyens pour chaque échantillon montre que les modèles conceptuels des membres « anciens » de la CEDE sont plus divers et complexes que ceux des nouveaux ou non membres. On observe ainsi un gradient de complexité de l'échantillon des non participants (qui disposent de l'indice de complexité le plus faible) au groupe des anciens de la CEDE. Il apparaît que l'échange d'information durant les réunions permet aux membres d'apprendre collectivement au sujet de la gestion de l'eau notamment sur les enjeux organisationnels, sociaux et techniques. Ces réunions semblent aider les membres à construire et partager une représentation du système de gestion de l'eau. L'exercice avec un groupe de douze membres de la CEDE valide notre troisième hypothèse en montrant comment il peut être le moyen de poursuivre l'apprentissage collectif au-delà des réunions usuelles (figure ci-après).

- Implications pratiques : l'institutionnalisation de la CEDE et ses enjeux de représentation

Les exercices de construction des modèles conceptuels et les analyses de consensus montrent que les chasseurs, les éleveurs et les propriétaires privés sont les grands absents dans la participation effective à ce titre à la CEDE. Ce résultat, en partie déjà identifié par certains membres, soulignent les problèmes de représentativité de cette commission *ad hoc* et les conflits potentiels de légitimité de ses décisions. Les enjeux de pouvoir semblent avoir évolué des acteurs « forts » du système (riziculteurs, grands propriétaires terriens) aux acteurs autrefois plus « faibles », les pêcheurs et les acteurs institutionnels (services de l'Etat, ASA, parc naturel régional, scientifiques, élus et gestionnaires d'aire protégée). La CEDE est un forum informel. Cependant, ses décisions sont de plus en plus mises en œuvre et relayées par la commission « gestion de l'eau et des milieux aquatiques » (CGO) du PNRC, laquelle a été élargie fin 2008 à « chasse et pêche » (cf. fiche 5.1.1). Il semble qu'un besoin de changement de représentation et d'établissement de règles de composition, relatif au processus d'institutionnalisation de la CEDE, voit le jour afin de limiter les risques de manipulation par certaines catégories d'acteurs. Intégrer les chasseurs et les propriétaires privés reste néanmoins difficile en absence de représentation officielle par une structure existante. Mais, l'exercice a montré que leur influence sur la gestion de l'eau à l'échelle de leur propriété et zone humide, est sous estimée à l'échelle globale au regard en tout cas des schémas produits par les individus issus des deux échantillons.

L'institutionnalisation (à considérer qu'elle soit en cours..) de la CEDE va impliquer un positionnement plus efficace au regard de la gestion globale de l'eau en Camargue et va permettre d'afficher plus clairement son rôle, y compris celui de relais en termes de demandes de recherches scientifiques auprès de la commission gestion de l'eau.

Son rattachement à la charte du Parc devrait permettre de mieux connaître et reconnaître le travail qui y est effectué, de valider des besoins dépassant son cadre d'activité, et de renforcer l'objectif du Parc, qui est d'évoluer vers une meilleure gestion globale de l'eau. Le travail effectué au sein de cette commission et ses objectifs d'évolution sont très positifs, surtout dans un contexte de conflits et d'enjeux si importants. Il est toutefois nécessaire que la CEDE mette en place des critères d'adhésion et que la représentativité de ses membres soit rendue plus explicite.

- Recommandations et limites éventuelles : vers un nouveau dispositif d'animation pour un apprentissage individuel et collectif plus performant ?

L'objectif de cette commission est bien de réfléchir collectivement à la gestion globale de l'eau de l'Ile de Camargue et de prendre des décisions ou orientations de gestion opérationnelle (d'où le terme « exécutive ») en fonctions des ouvrages manœuvrables disponibles. Dans ce contexte comment mieux accompagner l'apprentissage des acteurs afin de les amener à participer pleinement au choix de gestion et d'évolution du territoire ? Il ressort de nos travaux que l'apprentissage se déroule en participant à la CEDE, même si pour certains, cette commission demeure le lieu d'expression d'intérêts particuliers ou catégoriels. Il ressort également qu'au-delà de l'acquisition ponctuelle de connaissances voire de pratiques, au-delà d'échanger sur les points de vue des uns et des autres, sur les valeurs, la CEDE a besoin pour aller plus loin de développer un dispositif permettant d'apprendre collectivement à apprendre à plusieurs niveaux décisionnels. Il s'agit de développer un dispositif qui permette, au-delà de la concertation actuelle, d'interagir au niveau individuel afin d'accroître le capital humain, au niveau du groupe mobilisé afin d'accroître le capital social, et enfin au niveau institutionnel local afin d'accroître ce que nous avons appelé le

capital territorial (Mathevet, 2004). Il s'agit bien de développer un dispositif d'apprentissage à chacun de ces niveaux pour parvenir à dépasser l'apprentissage en simple boucle d'Argyris et Schön (1996) et même l'apprentissage en double boucle pour tendre vers un nouveau cadre d'apprentissage permettant de modifier valeurs et pratiques de ces trois niveaux d'organisations. Il s'agit de changer les références qui orientent à la fois l'action individuelle et l'action collective, accepter la remise en cause, faire évoluer les échanges et les réseaux sociaux, développer des partenariats, s'inscrire dans un apprentissage permanent et des relations constructives.

- Réalisations pratiques et valorisation :

Le bilan effectué avec les personnes interrogées suite aux entretiens est positif, l'expérience de conception individuelle et collective de schémas systémiques est jugée très intéressante, comme le souligne un acteur local « j'ai vraiment pris conscience lors de l'exercice de l'absence d'actions directes du parc ou des municipalités, alors que je croyais que c'était des acteurs majeurs de la gestion de l'eau ». Il se dégage que l'utilisation de schémas systémiques permet une prise de conscience des lacunes concernant le fonctionnement hydraulique du système camarguais et des usages de certains acteurs, considérés comme silencieux dans les discussions collectives (par exemple les éleveurs). « Je commence à comprendre pourquoi je me fais avoir depuis trente ans » commente un acteur. « Cela met en évidence la complexité du système » précise un responsable de l'administration, « finalement l'Etat est très peu représenté au niveau de ses activités régaliennes, ce qui est typique de la Camargue » commente un autre. « La multiplicité des acteurs, puis le schéma final montre qu'en dehors de la gestion thématique et locale, il y a une faible centralisation de la gestion sociale de l'eau. Il s'agit d'actions en cours, le schéma nous révèle la prise de conscience du décalage entre notre discours et la réalité, nos ambitions » s'attarde un représentant de l'Etat. « Tu comprends mieux pourquoi c'est compliqué la Camargue » conclut un gestionnaire.

Les personnes interrogées sont également surprises et satisfaites du résultat produit par cette méthode, soit la conception de leur représentation du système sous la forme d'un modèle. Le modèle créé rend compte de la complexité de la gestion de l'eau en Camargue et fait ressortir les zones qui restent confuses. Les individus pensent globalement que c'est une méthode efficace pour dégager le système global de la gestion de l'eau, nécessaire pour la mise en place d'actions concrètes. « L'intérêt de l'exercice est de réviser et de repositionner certains mécanismes ou acteurs que j'avais mis de côté ou que j'avais oublié car centré sur autre chose » commente un scientifique. Certains participants à ce travail, comme un représentant d'une ASA, ont immédiatement demandé l'accès à leur schéma pour l'utiliser pour décrire le système de gestion de l'eau auprès des membres de leur structure.

L'approche de modélisation d'accompagnement, qui sera prolongée à travers la poursuite du développement du jeu de rôles (cf. fiche 5.2.2), devrait permettre de préciser les conditions nécessaires de mise en place d'un nouveau cadre d'apprentissage au sein de cette commission.

POUR EN SAVOIR PLUS (QUELQUES REFERENCES)

- Antona M., D'Aquino P., Aubert S., Barreteau O., Boissau S., Bousquet F., Daré W., Etienne M., Le Page C., Mathevet R., Trébuil G., et J. Weber (Collectif Commod), (2005). *La modélisation comme outil d'accompagnement*. Natures Sciences Sociétés, 13: 165-168.
- Argyris, C., and D. Schön. 1996. *Organizational learning II: Theory, method and practice*, Reading, Mass: Addison Wesley.

- Bioret F. & R. Mathevet (2008). La gestion adaptative des territoires de la biodiversité. in L. Garnier (ed.), *Entre l'Homme et la Nature : une démarche pour des relations durables*. Réserves de biosphère, Notes Techniques n°3, UNESCO, Paris, pp.74-76.
- Collectif ComMod, (2006). Modélisation d'accompagnement», In F. Amblard and D. Phan (Edit), *Modélisation et simulation multi-agents pour les sciences de l'homme et la société: une introduction*, Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, p. 217-228.
- Dervieux, A., Jolly, G., Allouche, A. (2006). Gestion de l'eau et projet de territoire : vers une gestion intégrée du delta du Rhône. *Vertigo – La revue en sciences de l'environnement*, Vol7no3, décembre 2006. [online] URL: www.vertigo.uqam.ca/vol7no3/framerevue.html
- Etienne M., (2006). La modélisation d'accompagnement : un outil de dialogue et de concertation dans les réserves de biosphère, In Bouamrane M (Edit), *Biodiversité et acteurs : des itinéraires de concertation*, Réserves de Biosphère, note technique 1, Paris, UNESCO, 2006, p. 44-52.
- Jones N., Ross H., Perez P., Lynam T., Leitch A., Mathevet R. (2010). Mental Models: an interdisciplinary synthesis of theory and methods. *Ecology and Society*, soumis en mai 09.
- Lardon S., Le Ber F., Brassac C., Caron P., Mainguenaud M., Préau J., (2006). Conception collaborative d'objets géographiques. Application aux jeux de territoire », *Revue Internationale de Géomatique*, vol 16,2, 2006, p.269-284.
- Mathevet R. (2008). Roubine et marais : quand la nature s'artificialise in L. Garnier (ed.), *Entre l'Homme et la Nature : une démarche pour des relations durables*. Réserves de biosphère, Notes Techniques n°3, UNESCO, Paris, pp.92.
- Mathevet R., Le Page C., Etienne M., Lefebvre G., Poulin B., Gigot G., Proréol S., Mauchamp A., (2007). ButorStar : a role-playing game for collective awareness of reedbed wise use, *Simulation and Gaming*, 38(2), p. 233-262.
- Mathevet R., (2004). *Camargue incertaine. Sciences, usages et natures*. Buchet-Chastel Editions, Paris.
- Mathevet R., Etienne M., Calvet C. (2010). Mental Models and Water Management in the Camargue Biosphere Reserve: Applying ARDI. *Ecology and Society*, soumis en mai 09.

Fiche thématique 5.2.2 : CEDESIM : un jeu de territoire autour de la gestion sociale de l'eau

Responsable : Raphaël Mathevet CNRS CEFE – Montpellier

Action 5.2 - Gestion concertée en zone humide littorale: approche par la modélisation d'accompagnement.

CONTEXTE GENERAL

Comme rappelé dans la fiche thématique 5.2.1, l'objectif est de définir et mettre en œuvre un dispositif stimulant l'interaction entre les différents porteurs de connaissances sur le système écologique et social de l'île de Camargue, qu'ils soient chercheurs ou acteurs locaux, au moyen notamment d'un jeu de rôles et d'un modèle de simulation multi-agents. Nous développons une approche qui permet une exploration du capital territorial (Mathevet, 2004) en s'inscrivant dans une approche dialogique (Callon et al. 2001) qui favorise un travail de traduction propice à la transformation des opinions et du capital social des acteurs mobilisés. En créant un espace de dialogue ouvert et rassemblant des acteurs aux intérêts et visions hétérogènes comme des chasseurs, des techniciens municipaux, des représentants de syndicat d'irrigation, des pêcheurs et des naturalistes, nous créons un forum hybride au sens de Callon et al. (2001). Les entretiens individuels puis les réunions collectives permettent aux acteurs du territoire d'exprimer leurs opinions, leurs préférences sur la gestion de l'eau, des milieux et sur les processus de prise de décision. L'exploration des mondes possibles devrait permettre de dépasser la logique d'expertise classique pour tendre vers davantage de coopération et de légitimation des savoirs portés par les acteurs mobilisés. L'exploration du collectif doit reposer sur la création d'un processus d'interactions sociales, de discussions, de négociations entre les acteurs impliqués dans le projet. Cela doit permettre de partager leurs expériences, de dépasser certains conflits et de mettre en perspective l'intérêt de la démarche au regard des questions concrètes de gestion de l'eau et des étangs centraux.

Notre approche n'a pas vocation à se substituer aux démarches de concertation en cours au sein de la CEDE et dans les multiples forums camarguais mais de favoriser le partage des points de vue. Néanmoins, les changements qu'il est susceptible d'induire chez les acteurs favorisent le passage d'un régime d'implication à celui d'un engagement dans un processus destiné à modifier le fonctionnement actuel du système. Notre démarche d'accompagnement vise à favoriser la qualité du processus qui conduit à un choix de gestion et à établir les conditions du suivi et de sa révision éventuelle. En nous inscrivant dans une approche post-normale (Funtowicz et Ravetz, 1993), nous reconnaissons également l'importance de l'incertitude et des valeurs des acteurs dans la prise de décision. Les discussions, relatives à la gestion des incertitudes du fonctionnement du milieu, devraient montrer l'intérêt du jeu comme outil d'apprentissage collectif des dynamiques socio-écologiques. Le processus d'apprentissage attendu devrait se situer à plusieurs niveaux : (1) individuel, chaque acteur apprend individuellement les connaissances des autres (capital humain) ; (2) collectif au sein du groupe, les joueurs apprennent collectivement à partir de la mise en commun des connaissances individuelles (capital social) ; (3) au sein des institutions en charge de la coordination et de la gestion du territoire (capital territorial).

OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

En se basant d'une part, sur les travaux de modélisation hydrologique réalisés par la Tour du Valat et d'autre part, sur une analyse du fonctionnement de la Commission Exécutive de l'Eau (CEDE) réalisée par le CNRS DESMID, il s'agissait initialement dans ce projet de réaliser une adaptation du jeu de rôles ButorStar, développé dans le cadre du projet européen Life Nature, au contexte de la gestion de l'Île de Camargue. Une série de séances de mise en situation des usagers de la zone humide devait permettre de tester ensemble des scénarios de politiques publiques afin d'évaluer leurs effets tant écologiques que socio-économiques à plusieurs niveaux spatiaux.

En raison des difficultés de mobilisation des acteurs locaux, dans un contexte social local particulier (déstabilisation du parc naturel régional par une procédure en justice), fort occupés à participer aux très nombreuses réunions organisées par le Parc naturel régional de Camargue dans le cadre de la révision de sa Charte et de la mise en œuvre de Natura 2000, il a été décidé en accord avec les partenaires institutionnels de minimiser le nombre de réunions afin d'éviter une démobilisation générale des acteurs locaux. Nous avons donc adapté nos objectifs, ceux-ci se décomposent comme suit :

- sensibilisation des membres de la CEDE à l'approche jeu de rôles et à la modélisation d'accompagnement via l'organisation de séances de jeu (2006) – cf. Fiche 2 ;
- élaboration d'une étude comparative afin de tester les niveaux d'apprentissage de deux échantillons, les membres de la CEDE versus un groupe d'acteurs locaux non participants à ce forum (2007-08) – cf. Fiche 1 ;
- élaboration d'un modèle conceptuel collectif du fonctionnement de l'Île de Camargue avec un groupe d'acteurs issus de la CEDE (2008) – cf. Fiche 1 ;
- implémentation d'un modèle multi-agents afin de développer un simulateur support d'un jeu de territoire, support d'aide à la réflexion collective : CEDESIM (2008-09) – cf. Fiche 2.

RESULTATS OBTENUS

MISE EN SITUATION DES MEMBRES DE LA CEDE

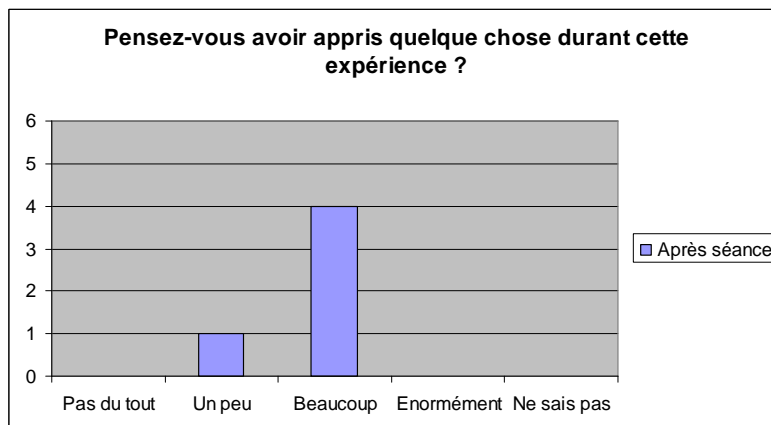
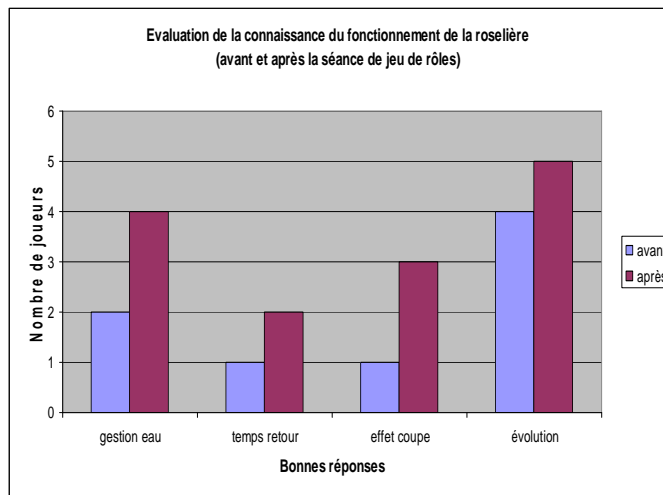
Les travaux ont débuté au second semestre 2006. Une séance de jeu a été organisée avec le PNR de Camargue et les membres de la CEDE. L'objectif de cet atelier consistait à mettre au point une méthode innovante de participation basée sur l'emploi du jeu de rôles ButorStar, comme outil d'accompagnement de la réflexion des usagers sur la gestion collective d'une zone humide. La séance a eu lieu en novembre 2006 avec six membres de la CEDE. Il s'agissait d'amener les joueurs à considérer la perspective des autres joueurs, de les mettre en situation afin qu'ils se rendent compte des enjeux techniques, sociaux, économiques et environnementaux de chaque usage. Il s'agissait de favoriser la discussion sur une gestion globale et l'intérêt de la concertation. Dans cette perspective, cette séance avait également comme objectif de tester ce que peut apporter l'outil et la démarche, d'évaluer avec des acteurs de terrain, ce que peut apporter le jeu et ce qu'il peut engendrer comme réactions. L'évaluation a été réalisée à partir de questionnaires. Des questions identiques ont été posées individuellement avant et après le jeu de rôles.

Les principaux résultats de la séance de jeu de rôles avec les membres de la CEDE sont :

Les joueurs ont sensiblement amélioré leurs connaissances sur l'évolution écologique de la roselière sous les effets des activités humaines, notamment ceux liés à la coupe et au pâturage. La prise de conscience des effets des pratiques des usagers sur les autres usages et le milieu est démontrée par l'évaluation de l'acquisition de connaissances mais aussi par les commentaires étayant les réponses aux questionnaires. Pour plus des deux tiers des joueurs

cette expérience aurait modifié leur façon de voir le fonctionnement des marais et de considérer les relations des hommes entre eux au sujet du fonctionnement des marais.

Nous retiendrons également que la concertation a été dominante et les joueurs ont toujours tenté de répondre aux objectifs des autres. Les « experts » mobilisés ont été plutôt déstabilisés et ont peu investi les rôles qui leur étaient confiés. De ce fait, les discussions ont été très consensuelles. Le débriefing à chaud a montré (i) un intérêt mitigé de la part des « experts » mais un riziculteur s’est déclaré « vraiment enchanté » par l’expérience ; (ii) dans l’ensemble l’expérience est jugée intéressante mais trop éloignée des préoccupations de la gestion des étangs de la CEDE ; (iii) finalement la perspective d’aller vers une expérience similaire plus proche de la problématique de la gestion des étangs a motivé le groupe.





Séance de jeu de rôles : les « usagers » de l'espace se concertent sur la future gestion de l'eau...

L'atelier qui a suivi a permis de préciser l'intérêt non pas d'adapter ButorStar et de jouer des rôles d'usagers du territoire camarguais mais plutôt de développer un outil de simulation pour réfléchir aux décisions de gestion globale de l'eau dans l'Ile de Camargue. L'atelier a permis de décrire les principaux acteurs et ressources à simuler. Les joueurs ont également considéré que la période de la révision de la charte du PNRC n'était pas favorable pour réunir les différents partenaires déjà très sollicités par ailleurs.

Dans ce contexte un premier simulateur CEDESIM a été développé à partir de la plateforme de simulation multi-agents CORMAS et des travaux issus de la modélisation hydrologique développée par les chercheurs de la Tour du Valat. Ce premier prototype permettait de simuler la gestion de l'eau de l'Ile de Camargue, l'évolution de la salinité, des herbiers à zostères, et de caractériser la pêche et la biodiversité par des indicateurs. Cependant, ce premier travail de modélisation a permis de révéler que tous les membres de la CEDE ne semblaient pas partager la même vision du fonctionnement non seulement des étangs mais aussi des usages du bassin versant. Aussi, il a été décidé de réaliser une campagne d'entretiens individuels au second semestre 2007 et premier semestre 2008 afin d'établir des modèles individuels et collectifs à partir de la méthode ARDI pour discuter et construire une vision partagée du fonctionnement de la gestion de l'eau dans l'Ile de Camargue (cf. Fiche 1).

DEVELOPPEMENT D'UN JEU DE ROLES ASSISTE PAR ORDINATEUR : CEDESIM

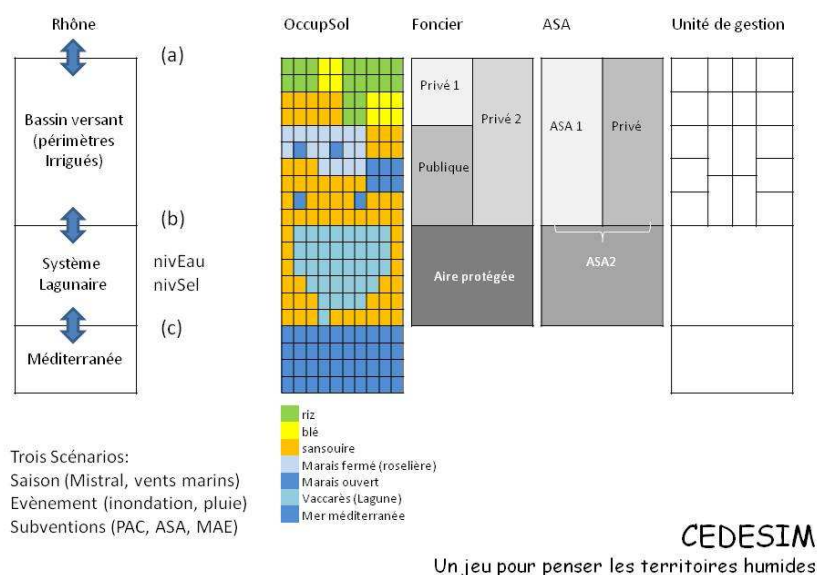
Le jeu de rôles CEDESIM (version 2) est basé sur un modèle simplifié des processus hydrologiques, écologiques, socio-économiques et spatiaux qui participent au fonctionnement de l'Ile de Camargue et des étangs centraux.

Il se décompose en trois sous-modèles : (1) un module hydrologique (niveau d'eau et salinité) et topographique qui définit les propriétés structurelles d'une zone humide virtuelle, (2) un module écologique qui simule la dynamique des milieux, des poissons et des oiseaux, (3) un module décisionnel qui rend compte des stratégies des principaux acteurs. Les décisions spécifiques à chaque type d'activités sont prises individuellement par chacun des principaux usagers (riziculteur, éleveur, exploitant de roseau, chasseur et gestionnaire d'aire protégée, animateur de la CEDE), tous soumis à la décision saisonnière de choix de gestion des ouvrages hydraulique pour mieux gérer les niveau d'eau et de sel du système. Le modèle de prise de décision laisse libre de règle les discussions et les négociations entre joueurs. Le modèle multi-agents qui sert de support au jeu de rôles a été développé sur la plateforme de simulation Cormas (Bousquet et al., 1998). Le simulateur remobilise les acquis de plusieurs

simulateurs (REEDSIM, BUTORSTAR et CEDESIM1) et sa conception se fonde sur les schémas systémiques produits lors des ateliers collectifs.

Les objectifs sont de fournir un outil de mise en situation assisté par un simulateur informatique afin de contribuer à animer la réflexion des acteurs locaux et des étudiants sur la problématique de la gestion sociale de l'eau dans l'Ile de Camargue. Les objectifs du jeu sont donc d'aider à discuter non pas seulement la gestion des ouvrages à la mer (principal objet de la CEDE) mais aussi les enjeux du territoire dans sa globalité et qui sous-tendent les contraintes et ces choix (nouvelles orientations de cette commission). Ainsi, le jeu doit pouvoir aider le joueur à mieux appréhender (1) les enjeux sociaux et économiques des différentes activités humaines en présence, (2) les relations d'interdépendances hydrologiques et biologiques, dans le temps et l'espace, (3) les modes d'interactions des participants dans les phases de concertation, leurs avantages et inconvénients ainsi que (4) les conceptions, mises en œuvre et effets des politiques publiques.

Le modèle multi-agents permet de simuler les effets à court et long terme de la gestion du territoire résultant des décisions prises par les joueurs. Ce modèle repose sur une représentation spatiale d'une zone humide archétype constituée d'un paysage virtuel divisé en quatre propriétés, deux privées, une communale, et une aire protégée, toutes interdépendantes d'un point de vue hydrologique (amont/aval). Chaque propriété est divisée en unités de gestion. Celles-ci peuvent être endiguées par les joueurs (2 à 10) s'ils souhaitent s'affranchir des contraintes hydrauliques du voisinage. Cinq profils saisonniers de gestion de l'eau sont proposés aux joueurs, plusieurs étant plus particulièrement adaptés à un usage de la zone humide. Les décisions d'utilisation du sol et de gestion de l'eau sont prises par les joueurs au niveau de la zone humide globale, de leur propriété et des unités de gestion. Ces décisions sont le résultat d'une négociation entre les joueurs localement et globalement lors de leur participation à une commission exécutive de l'eau. Elles sont intégrées dans le modèle par le maître de jeu. Leurs effets sur la salinité et les niveaux d'eau, les gains des joueurs, l'occupation du sol (par exemple passage de la sansouïre à la rizière, la roselière ou l'eau libre), sur la présence et la distribution spatiale de la faune sont simulés par l'ordinateur.



IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS, REALISATIONS PRATIQUES, VALORISATION

- Implications pratiques :

Ce jeu et son simulateur ont été l'objet d'un premier test avec des étudiants. Des éléments de calibrage (ressource piscicole et revenu pêche notamment) doivent être précisés dans les prochains mois lors d'un test avec les membres de la CEDE. Il s'agira d'une part, de finaliser les règles de décision, le choix des indicateurs et les points de vue nécessaires à leur décision et d'autre part, de clarifier collectivement les hypothèses, les choix de modélisation ainsi que les scénarios. L'interfaçage informatique devra être également révisé afin d'accroître l'ergonomie pour un transfert plus aisé de l'outil vers les enseignants et les animateurs du territoire camarguais.

- Recommandations et limites éventuelles :

Nos travaux (cf. Fiche 5.2.1) ont montré l'intérêt de traiter non seulement de la problématique de gestion des vannes hydrauliques entre la mer et les étangs centraux mais d'inscrire pleinement la réflexion collective sur les relations amont-aval et les enjeux de connaissances afférents. Ainsi, l'outil de simulation a-t-il évolué vers non plus seulement une mise en situation assistée par un simulateur informatique de la gestion de l'aval mais vers un jeu de territoire qui intègre pleinement les différentes gestions à différentes échelles de temps et d'espace dans un contexte de gestion multi-acteurs, cela afin de mieux comprendre les marges de manœuvre et les facteurs explicatifs des contraintes imposées à l'aval par les gestions des espaces situés en amont.

- Réalisations pratiques et valorisation :

Conçu pour être le support d'une réflexion collective des usagers et des fournisseurs d'infrastructures publiques pour une gestion durable du territoire, cet outil est également destiné à sensibiliser les étudiants à la gestion concertée des espaces humides. L'approche de modélisation d'accompagnement, sera poursuivie dans le projet CAMADAPT (programme LITEAU III). Elle devrait permettre de préciser les conditions nécessaires de mise en place d'un nouveau cadre d'apprentissage et de définir avec les parties prenantes les éléments de l'évaluation collective et individuelle de ce dernier.

Plus que jamais, la construction de dispositifs interdisciplinaires d'interactions entre chercheurs, acteurs locaux, bailleur de fonds et gestionnaires est nécessaire pour développer une gestion sociale garantissant une participation effective des partenaires. L'expérience menée dans le cadre de GIZCAM montre l'importance du dispositif de recherche-action mais aussi l'importance de s'inscrire dans les dispositifs existants d'animation territoriale.

POUR EN SAVOIR PLUS (QUELQUES REFERENCES)

- Antona M., D'Aquino P., Aubert S., Barreteau O., Boissau S., Bousquet F., Daré W., Etienne M., Le Page C., Mathevet R., Trébuil G., et J. Weber (Collectif ComMod), (2005). *La modélisation comme outil d'accompagnement*. Natures Sciences Sociétés, 13: 165-168.
- Bonnet B., Aulong S., Goyet S., Lutz M., Mathevet R. (2005). *La gestion intégrée des zones humides méditerranéennes*. Conservation des zones humides, Tour du Valat, Arles, 160p.
- Bousquet, F., Bakam, I., Proton, H., & Le Page, C. (1998) Cormas: Common-Pool Resources and Multi-agent Systems. *IEA/AIE '98: Proceedings of the 11th International Conference on Industrial and Engineering Applications of Artificial Intelligence and Expert Systems: Tasks and Methods in Applied Artificial Intelligence, Lecture Notes in Computer Science*, 1416, New York: Springer, 826—837

- Callon M., Lascoumes P., Barthe Y., (1991). *Agir dans un monde incertain. Essai sur la démocratie technique*, Seuil, Collection La couleur des idées, Paris.
- Collectif ComMod, (2006). Modélisation d'accompagnement In F. Amblard and D. Phan (Edit), *Modélisation et simulation multi-agents pour les sciences de l'homme et la société: une introduction*, Londres, Hermes-Sciences & Lavoisier, p. 217-228.
- Funtowicz S. O., Ravetz J. R., (1993). Science for the post-normal age, *Futures* 25 (7), p. 739-755.
- Mathevet R. (2007). *Éducation et médiation, un jeu de rôle assisté par ordinateur comme support de médiation*, Espaces Naturels 19 : 26-27.
- Mathevet R., (2004). *Camargue incertaine. Sciences, usages et natures*. Buchet-Chastel Editions, Paris.
- Mathevet R., Bousquet F., Le Page C., Antona M. (2003). Agent-based simulations of interactions between duck population, farming decision and hunting leasing in the Camargue (Southern France). *Ecological Modelling* 165: 107-126.
- Mathevet R., Le Page C., Etienne M., Lefebvre G., Poulin B., Gigot G., Proréol S., Mauchamp A., (2007). ButorStar : a Role-Playing Game for Collective Awareness of Wise Reedbed Use. *Simulation & Gaming* 38(2): 233-262.
- Mathevet R., Le Page C., Etienne M., Poulin B., Lefebvre G., Cazin F., Ruffray X., (2008). Des roselières et des hommes, ButorStar : un jeu de rôles pour l'aide à la gestion collective. *Revue Internationale de Géomatique* 18 : 375-395.
- Mathevet R., Mauchamp, A., Lifran, R., Poulin, B., Lefebvre, G., (2003). ReedSim: Simulating Ecological and Economical Dynamics of Mediterranean Reedbeds, In Post, D. (sous la dir.). Integrative Modelling of Biophysical, Social and Economic Systems for Resource Management Solution. Modelling and Simulation Society of Australia and New Zealand Inc., Townsville, Australia, pp. 1007-1012.

ANNEXE : TEXTES DES PUBLICATIONS

Cette partie peut être rendue sous forme non modifiable (fichier pdf de préférence).

Son format est laissé à la libre appréciation de ses rédacteurs.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PARUES

Merci de joindre des tirés à part, et d'indiquer les restrictions éventuelles en termes de droits de reproduction (notamment sur le site Internet du MEDD). Notez que ce rapport pourra être mis en ligne sur le site Internet du MEDD.

NB : les pdf correspondant à des articles de revue (exceptés ceux édités en ligne) ne peuvent être mis en ligne sur le site du Ministère.

- Brunel, C., Sabatier, F., 2009. Potential sea-level rise influences in controlling shoreline position for French Mediterranean Coast. *Geomorphology*, vol. 107 (1-2): 79-89.
- Comoretto, L., B. Arfib et S. Chiron, 2007. Pesticides in the Rhône river delta (France): Basic data for a field-based exposure assessment. *Sci Total Environ* doi:10.1016/j.scitotenv.2006.11.046.,
- Comoretto, L., B. Arfib, R. Talva, P. Chauvelon, M. Pichaud, S. Chiron and P. Höhener, 2008. Runoff of pesticides from rice fields in the Ile de Camargue (Rhône river delta, France): Field study and modeling. *Environ Pollut* 151, 486-493.
- Crivelli, A.J, Auphan, N., Chauvelon, P., Sandoz, A., Menella, J-Y. & G. Poizat, 2008. Glass eel recruitment in a Mediterranean lagoon assessed by a glass eel trap: factors explaining the catches. *Hydrobiologia*, 602: 79-86.
- Dervieux, A., 2005. La difficile gestion globale de l'eau en Camargue (France) : le Contrat de delta. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*. Vol 6, n°3. www.vertigo.uqam.ca/vol6no3/art13vol6no3/alain_dervieux.html [mis en ligne en juillet 2006].
- Dervieux, A., Jolly, G., Allouche, A. 2006. Gestion de l'eau et projet de territoire : vers une gestion intégrée du delta du Rhône. *VertigO, La Revue des Sciences de l'Environnement*. **Vertigo**. Vol. 7, n°3. <http://vertigo.revues.org/index1422.html>
- Sabatier, F., Samat, O., Ullmann, A. et Suanez, S., 2009. Connecting large-scale coastal behaviour with coastal management of the Rhone delta. *Geomorphology*, vol. 107 (1-2): 47-57.
- Samat, O., Sabatier, F., Lambert, A., 2007. Bathymetric impacts of a seawall on a microtidal beach (North of the Gulf of Lions, Mediterranean coast). *Méditerranée*, 108, 119-124.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES A PARAITRE

- Jones N., Ross H., Perez P., Lynam T., Leitch A., Mathevet R. (2010). Mental Models: an interdisciplinary synthesis of theory and methods. *Ecology and Society*, soumis en mai 09.
- Höhener, P., Comoretto, L., Al Housari, F., Chauvelon, P., Pichaud, M., Cherain, Y., Chiron, S. (soumis). Modelling anthropogenic substances in coastal wetlands: application to herbicides in the Camargue (France). *Environmental Modelling and Software*.
- Loubet A ; Pichaud M ; Chauvelon P. (soumis) Gestion hydraulique et flux hydro-sédimentaires dans l'Ile de Camargue. *Revue de la Société Hydrotechnique de France*
- Mathevet R., Etienne M., Calvet C. (2010). Mental Models and Water Management in the Camargue Biosphere Reserve: Applying ARDI. *Ecology and Society*, soumis en mai 09.

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES PRÉVUES

- Sabatier, F. and Samat, O. Estimation of downdrift erosion caused by groynes. *Revue ; Coastal Engineering ?*
- Chauvelon et al : Modélisation d'un hydrosystème en crise hydroclimatique
- Chauvelon et al : Flux hydro salin et sédimentaire, dans l'Ile de Camargue quantification et approche de modélisation

ANNEXE : PARTIE CONFIDENTIELLE

Vous pouvez insérer ici toute information ou résultat qui revêt une part de confidentialité.

Merci de préciser le degré de confidentialité de ces données.

Nous vous recommandons de préciser dans la partie non confidentielle l'existence de ces données confidentielle et d'expliquer la raison de leur confidentialité.

Cette partie ne sera pas diffusée sur le site Internet du Ministère.

Cette partie peut être rendue sous forme non modifiable (fichier pdf de préférence).

Son format est laissé à la libre appréciation de ses rédacteurs.