

**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

SYNTHESE

(destinée aux utilisateurs et gestionnaires publics)

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, 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

En français

CONTEXTE GENERAL

Quelle situation, quels enjeux motivent ce projet ?

Durant les 15 dernières années, plusieurs projets de recherche se sont succédé sur le delta du Rhône, visant à mieux comprendre les processus physiques, biologiques, sociaux et leurs interactions. En prolongement et en complément, le projet GIZCAM propose la coordination de plusieurs axes de recherche ayant pour objectif de tendre vers une gestion intégrée de cette zone côtière en essayant de mieux formaliser, quantifier, modéliser, les processus physiques et sociaux concernés par la gestion de l'eau et du littoral, en vue d'améliorer le transfert de ces connaissances vers les gestionnaires.

OBJECTIFS GENERAUX DU PROJET

Action 1 : Simulation du fonctionnement hydrologique de l'Ile de Camargue, en particulier en fonctionnement de crise hydro-climatique. Quantification des flux et variations de stock (sel et sédiments) associés au fonctionnement hydraulique de l'hydrosystème Vaccarès.

Action 2 : un Système d'Information Géographique (SIG), pour la partie occupation du sol agricole et le secteur endigué de transition (vers le milieu marin) des lagunes et sansouïres, permettant une analyse de son évolution morphologique récente.

Action 3 Volet 1 : Modélisation des flux et transferts de pesticides les plus couramment utilisés en Camargue.

Action 3 volet 2 : Quantifier expérimentalement les apports d'eaux souterraines aux étangs par la géochimie.

Action 4 : L'étude de l'évolution, dans des secteurs sensibles, du trait de côte et des profils bathymétriques, en relation avec les aménagements et le forçage par la houle.

Action 5 Volet 1 : Une analyse de la gestion de l'eau, au travers du fonctionnement de la commission exécutive de l'eau de l'Ile de Camargue (CEDE).

Action 5 Volet 2 : L'utilisation de la simulation par modélisation d'accompagnement orientée jeu de rôle, pour animer la réflexion sur la gestion durable des zones humides littorales.

QUELQUES ELEMENTS DE METHODOLOGIE (ET EVENTUELLES DIFFICULTES RENCONTREES)

Après une analyse des contraintes de gestion hydraulique de l'Ile de Camargue en conditions hydro-climatiques extrêmes, un outil 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 a été développé. 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) et forçage par des hydrogrammes de drainage de la zone inondée du Nord de l'Ile de Camargue (du type de 1993 ou 1994).

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.

Les difficultés rencontrées sur l'obtention d'une description topographique précise des zones de débordement, les interruptions de mesures de conductivité en continu 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. Les informations complémentaires acquises sur la riziculture du bassin versant et sur la dynamique des matières en suspension sous l'effet du vent, nous ont permis d'estimer un bilan sédimentaire sur le système Vaccarès pour la dernière décennie.

Pour la mise à jour du SIG de l'occupation du sol développé (en particulier pour la riziculture depuis 2000): la télédétection satellitale a été utilisée. Pour l'étude de l'évolution récente de la morphologie du sud du système lagunaire, la numérisation d'orthophotographies a été réalisée (1953, 1977, 2003) ; et l'intégration de données topo-bathymétrique a permis de développer des modèles numériques d'altitude utilisés pour établir des relations niveau/volume pour les étangs.

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. La mesure de ces flux lors de deux campagnes de terrain a été utilisée pour estimer les apports souterrains au Vaccarès.

Pour la modélisation des transferts de pesticides, les suivis ont été effectués (avant et pendant le projet) pendant les saisons culturales (Avril – Octobre) en 9 points d'échantillonnage 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.

En ce qui concerne l'action 4 (Protection côtière et dynamique littorale), les méthodes combinent du SIG, des relevés topo-bathymétriques de précisions (théodolithe, DGPS, sondeur, Hypack), de la courantologie (S4ADW, ADCP et ADV) et une modélisation de la propagation de la houle (STWAVE).

Des entretiens semi directifs et la participation à toutes les réunions de la Commission Executive de l'Eau (CEDE) ont permis de préciser son fonctionnement, ses contraintes et son évolution récente.

Afin de tester des hypothèses sur le caractère « apprenant » de la CEDE une approche de modélisation participative a été développée, mobilisant 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. En raison des difficultés de mobilisation des acteurs locaux, dans un contexte social local particulier, 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 qui 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'Île de Camargue.

RESULTATS OBTENUS

On retiendra de l'analyse des précipitations extrêmes journalières 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.

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. 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.

Le niveau marin moyen à la Fourcade 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. 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. 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 en 2003. 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. Les mesures par flux entrant depuis 2003 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.

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 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.

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.

Les variations de stock de sel des étangs et le bilan des flux estimés sur le système Vaccarès ont été estimées respectivement pour les périodes 2003-2004 et 2006-2008.

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 ». 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 « stock de sel des étangs » et permettent d'expliquer les divergences entre ce dernier et le bilan des flux.

Le flux d'eau souterraine nécessaire pour expliquer les estimations de bilan de radon sur le Vaccarès au mois de Juin dans les conditions rencontrées, doit être compris entre 1,3 et 1,5 m³/s. Si de tels chiffres semblent importants, ils ne représentent en volume total que 0,14% de celui de l'étang mais sont tout de même équivalents à 24% des apports estimés issus des canaux à ces périodes.

Concernant les pesticides, 4 matières actives ont principalement été suivies (l'alphaméthrine, le MCPA, l'oxadiazon et le prétilachlore), présentant des propriétés physico-chimiques différentes et utilisées sur l'exploitation. 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. Les travaux réalisés ensuite ont permis la mise en oeuvre d'un nouveau modèle pour simuler les substances chimiques dans l'hydrosystème. 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'Ile de Camargue. MASAS est donc utilisé en amont pour modéliser la réactivité des polluants, et HSC PEST en aval pour la répartition spatio-temporelle.

Pour l'action 4 (Protection côtière et dynamique littorale), trois principaux travaux ont été conduits. Tout d'abord, nous avons étudié l'érosion en aval dérive (cf figure 1 pour l'orientation dominante de la dérive selon les secteurs) des épis à partir des variations du rivage (figure 2). 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 supérieur 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

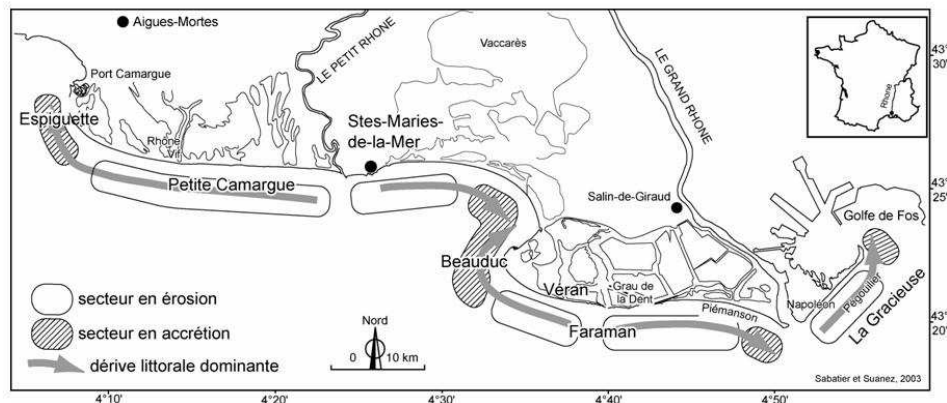


Figure 1 : Direction de la dérive littorale dominante, zones d'érosion et d'accrétion sur le littoral du delta du Rhône.

Ensuite, l'impact d'une digue frontale sur l'évolution des fonds est appréhendé au moyen de relevés bathymétriques. Nos mesures de terrains (profils bathymétriques) mettent en évidence que les diges 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 dégraissage des barres d'avant côte et un ralentissement, voire l'absence des processus de régénération naturelle des plages.

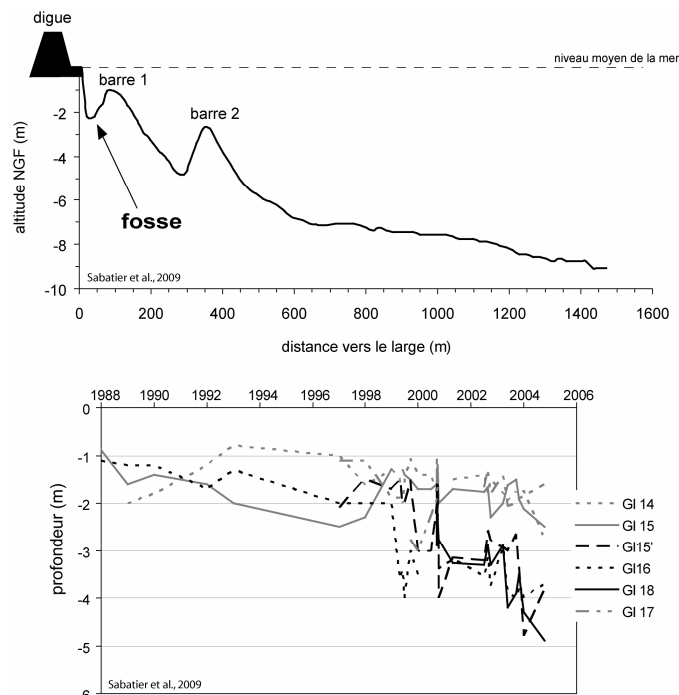


Fig. 2 : Profil bathymétrique (en haut) et évolution de la profondeur de la fosse interne depuis 1988 (en bas)(digue de Véran)

Enfin, l'érosion des fonds devant les Saintes-Maries-de-la-Mer est quantifiée par la comparaison de relevés bathymétriques (fig. 3). Depuis 30 ans environ, le rivage au niveau du village des Saintes-Maries-de-la-Mer est stabilisé par des structures en enrochements (diges, 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 (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'augmentation de l'érosion sous marine du secteur mais ces deux paramètres doivent être considérés. Le raidissement des fonds pourra conduire à des problèmes de stabilité des ouvrages, des surveillances bathymétriques doivent donc être envisagées.

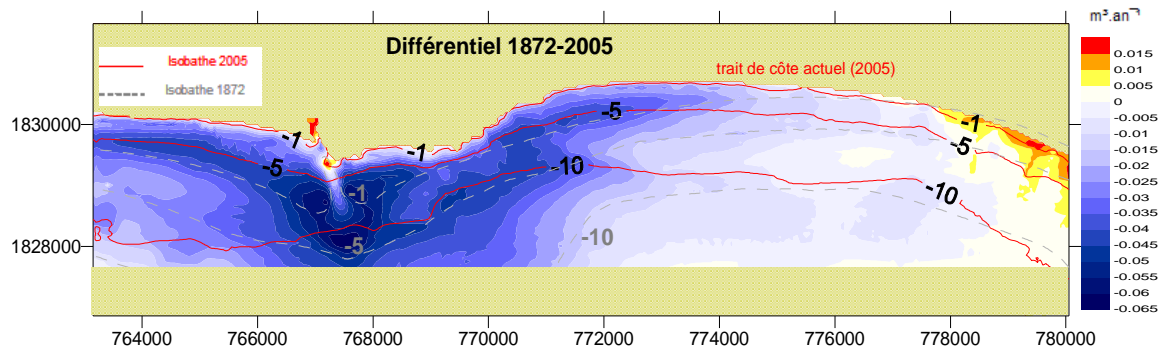


Figure 3: Evolution bathymétriques entre 1872 et 2005 devant les Saintes Maries de la Mer.

La CEDE, avec comme principal outil de gestion les 13 vannes du seul pertuis opérationnel permanent entre les étangs et la mer, pose les enjeux de la gestion globale de l'eau à l'échelle du territoire. 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 et ses dernières années de fonctionnement ont montré qu'elle peut se situer en marge des conflits qui ont agité le Parc de 2002 à 2007. Les échanges et enrichissements mutuels produits dans la CEDE permettent d'évoluer vers la compréhension des contraintes et la nécessité d'une gestion globale et partagée des eaux adaptée au territoire. Toutefois, les difficultés actuelles ne sont réellement partagées que par un nombre restreint de participants de la CEDE, impliqués pour la plupart dans la Commission Gestion de l'Eau et Milieux du Parc. Mais le lien entre aléas, élévation du niveau de la mer, surcotes concomitantes (vents de Sud) très défavorables pour la gestion hydraulique en cas précipitations abondantes, n'est pas cependant bien intégré : le risque lié au niveau marin est encore mal perçu malgré les événements de février 2009 (et auparavant ceux de 2003, où seul le risque fluvial a été bien appréhendé alors que la surcote marine, importante, aurait pu avoir des conséquences aggravantes pour l'Ile de Camargue y compris en cas de brèche dans les digues fluviales).

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. La vision des individus ne participant pas à la CEDE diffère significativement de celle portée par les membres de cette commission. 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 montre comment il peut être le moyen de poursuivre l'apprentissage collectif au-delà des réunions usuelles.

IMPLICATIONS PRATIQUES, RECOMMANDATIONS, REALISATIONS PRATIQUES, VALORISATION

- Implications 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 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 comme certains acteurs le demande déjà: 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 « 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.

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 d'assainissement de l'Eolienne). 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.

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 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.

- **Recommandations et limites éventuelles :**

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, 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. 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.

Concernant l'approche géochimique utilisant le radon, 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.

Pour la gestion du trait de cote à partir d'ouvrages en enrochements, nous démontrons par des mesures in situ les limites des digues frontales qui augmentent l'érosion des fonds par réflexion. Par contre, ces techniques permettent de fixer la position du rivage. Contrairement aux recommandations classiques d'ingénierie, nous montrons que le phénomène d'érosion en aval dérive des épis doit être envisagé sans stabilisation du rivage à long terme. Nous proposons des équations empiriques simples pour appréhender ces phénomènes. Enfin, l'érosion des fonds devant les Saintes-Maries-de-la-Mer est démontrée sans que nous ayons pu modéliser finement la conséquence du raidissement des pentes sous marines sur la force de la houle. Dans ce secteur à forts enjeux socio-économiques, des surveillances morphologiques et courantologiques doivent être conduites pour connaître et anticiper les risques.

Concernant les perspectives de gestion et de gouvernance de l'eau et du littoral, va-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 et l'érosion côtière ? Il semble que l'ensemble des acteurs camarguais ne soit pas prêt à combiner ces modes d'interventions dès maintenant.

Le projet ambitieux de gestion adaptative 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 pour les étangs.

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 apparaît indispensable de poursuivre le travail engagé avec la population à l'occasion de la préparation de la pré-chartre 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.

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.

Il ressort de nos travaux (Action 5 volet 2) 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 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.

Nos travaux 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 :**

- Contribution au développement du Plan d'action de la commission exécutive de l'eau .
- Participation aux Commissions de gestion de l'eau et des milieux aquatiques du PNRC
- Participation aux réunions de la Commission Exécutive De l'Eau (CEDE).
- Participation au Groupe de travail « Gestion de l'Eau et du Littoral » pour la révision de la charte du PNRC.
- Transfert prévu pour utilisation en séances de la CEDE de l'outil de simulation hydrologique.
- SIG de l'occupation du sol au niveau du parcellaire, mise à jour pour la riziculture sur la période 1993-2007.
- Méthode simple d'estimation de l'érosion en aval dérive des épis
- L'approche de modélisation d'accompagnement, sera poursuivie dans le projet CAMADAPT (programme LITEAU III).

PARTENARIATS MIS EN PLACE, PROJETS, ENVISAGES

Projet CAMPLAN, du programme « Eaux et territoires », en cours ; projet CAMADAPT, soumis pour le programme Liteau III, qui devrait débiter en 2010.

POUR EN SAVOIR PLUS (QUELQUES REFERENCES)

Nous renvoyons à la lecture du Rapport scientifique du Projet GIZCAM, rédigé sous forme de fiches thématiques adaptées au transfert :

- Fiche thématique 1.1 : Les contraintes hydro-climatiques et hydrauliques pour l'Île de Camargue
- Fiche thématique 1.2 : Modélisation du fonctionnement de l'hydrosystème Vaccarès dans l'Île de Camargue en situation de crise hydro climatique
- Fiche thématique 1.3 : Quantification des flux hydro-salins et sédimentaires dans l'hydrosystème Vaccarès
- Fiche thématique 2.1 : SIG de l'occupation du sol sur le bassin de l'Île de Camargue
- Fiche thématique 2.2 : Topo-bathymétrie du système Vaccarès et morphométrie de la zone des Etangs Inférieurs
- Fiche thématique 3.1 : Modélisation des flux de pesticides dans l'Île de Camargue.
- Fiche thématique 3.2 : Quantification des apports d'eaux souterraines à l'étang du Vaccarès.
- Fiche thématique 4.1 : Erosion du rivage 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
- Fiche thématique 4.3 : Erosion sous-marine devant les Saintes-Maries-de-la-Mer
- 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)
- 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
- Fiche thématique 5.2.1 : Représentations systémiques individuelles et apprentissages au sein de la Commission Exécutive de l'Eau
- Fiche thématique 5.2.2 : CEDESIM : un jeu de territoire autour de la gestion sociale de l'eau

LISTE DES OPERATIONS DE VALORISATION ISSUES DU CONTRAT (ARTICLES DE VALORISATION, PARTICIPATIONS A DES COLLOQUES, ENSEIGNEMENT ET FORMATION, COMMUNICATION, EXPERTISES...)

PUBLICATIONS SCIENTIFIQUES	
Publications scientifiques parues	<p>Brunel, C., Sabatier, F., 2009. Potential sea-level rise influences in controlling shoreline position for French Mediterranean Coast. <i>Geomorphology</i>, vol. 107 (1-2): 79-89.</p> <p>Comoretto, L., B. Arfib et S. Chiron, 2007. Pesticides in the Rhône river delta (France): Basic data for a field-based exposure assessment. <i>Sci Total Environ</i> doi:10.1016/j.scitotenv.2006.11.046.,</p> <p>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. <i>Environ Pollut</i> 151, 486-493.</p> <p>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. <i>Hydrobiologia</i>, 602: 79-86.</p> <p>Dervieux, A., 2005. La difficile gestion globale de l'eau en Camargue (France) : le Contrat de delta. <i>Vertigo</i> - 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].</p> <p>Dervieux, A., Jolly, G., Allouche, A. 2006. Gestion de l'eau et projet de territoire : vers une gestion intégrée du delta du Rhône. <i>Vertigo</i>, La Revue des Sciences de l'Environnement. Vertigo. Vol. 7, n°3.</p>

Participations futures à des colloques	<p>marine / crue en Camargue. Colloque SHF - Nouvelles approches sur les risques côtiers – Paris 30,31 Janvier 2008</p> <p>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.</p> <p>Mathevet, R., 2008. Colloque Deltas méditerranéens, Invité table ronde, Enjeux socioéconomiques de la conservation de la biodiversité, Ambassade de France, Barcelone 1-3 octobre 2008.</p> <p>Mathevet, R., 2008. Colloque du programme LITEAU, « regards croisés des projets Liteau sur le littoral », participation aux ateliers « comment formaliser les besoins de gestionnaires en questions de recherche ? », La Vieille Perrotine, Saint-Pierre d'Oléron, 2-3 avril 2008. MEDAD.</p> <p>Radakovitch, O., Mayer, A., Garcia Orellana, J., Garcia Solsona, E., Claude, C., Masque Barri, P., Chauvelon, P., Ollivier, P., 2007. Submarine groundwater discharge estimates on coastal waters based on ²²²Rn measurements. Rapp. Comm. int. Mer Médit., 38, 698.</p> <p>Sabatier, F., 2007. Evolution des plages du Golfe du Lion depuis le milieu du 19^{ème} siècle. Colloque Zone Atelier du CNRS ORME, Montpellier, 4 juin 2007, /communication.</p> <p>1 présentation (Gestion hydraulique et flux hydro-sédimentaires dans l'Île de Camargue) aux 31^{èmes} Journées de l'Hydraulique de la Société Hydrotechnique de France, Morphodynamique et gestion des sédiments dans les estuaires, les baies et les deltas, Paris, 22 et 23 septembre 2009.</p> <p>4 à 5 présentations ou posters au 4^{ème} 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.</p>
THESES	
Thèses passées	Samat, O., 2007. Efficacité et impacts des ouvrages en enrochement sur les plages micro tidales. Le cas du Languedoc et du delta du Rhône. Thèse Université Aix Marseille.
Thèses en cours	
ARTICLES DE VALORISATION-VULGARISATION	
Articles de valorisation parus	<p>Chauvelon, P., 2008. Histoires d'eau, de sel, et de sable... Quel avenir pour la Camargue ? Zones Humides Infos, n° 59-60, p 13-15.</p> <p>Mathevet R. (2007). <i>Éducation et médiation, un jeu de rôle assisté par ordinateur comme support de médiation</i>, Espaces Naturels 19 : 26-27.</p>
Articles de valorisation à paraître Articles de valorisation prévus	Dans la « Lettre des Lagunes » du Pole relais Lagunes Méditerranéennes
AUTRES ACTIONS VERS LES MEDIAS	
Actions vers les médias (interviews...) effectuées	<p>Avril 2007. France 3 (19-20, le journal des Régions), F. Sabatier est interviewé sur l'impact du changement climatique sur les plages de Camargue.</p> <p>Vendredi 25 mai 2007. France 3, Thalassa, Interview de F. Sabatier sur la montée de la mer et l'érosion des plages de</p>

	Camargue.
	Juillet 2007. France 2, Télématin, P. Chauvelon interviewé pour un reportage sur les effets du changement climatique en Camargue.
	2007. France 3 Région (Nîmes), 12-13, Le journal des régions, mardi 9 octobre 2007. Interview sur l'efficacité du rechargement dunaire sur le site des Baronnets.
	2007. France-Inter, F. Sabatier, le 12 mai 2007 sur l'avenir des côtes de Camargue.
	2007. France-Info, F. Sabatier, le 25 avril 2007 sur l'avenir des côtes de Camargue.
	2008. La radio de la mer, F. Sabatier, avril 2008, interview sur l'érosion des plages de Méditerranée
Actions vers les médias prévues	DESMID, Documentaire 1 en chantier, 1 en projet
ENSEIGNEMENT - FORMATION	
Enseignements/formations dispensés	Mathevet, Sabatier, Sandoz (Licence, M1 M2)
Enseignements/formations prévus	Chauvelon (M2 GEMA)
EXPERTISES	
Expertises menées	
Expertises en cours	
Expertises prévues	Elaboration Plan de gestion Etang de l'Impérial (pour le CG 13), (TDV et RNC avec BRL Ingénierie)
METHODOLOGIES (GUIDES...)	
méthodologies produites	
méthodologies en cours d'élaboration	
méthodologies prévues	
AUTRES	
Conférences de vulgarisation	Chauvelon, P., 2008. Modélisation du fonctionnement de l'hydrosystème Vaccarès dans l'île de Camargue en situation de crise hydro climatique, implications pour la gestion. Présentation à la Réunion Interrégionale « Répondre à l'élévation du niveau de la mer et l'augmentation des tempêtes marines sur le littoral méditerranéen », organisée par le Pôle Relais lagunes méditerranéennes, Montpellier, 7 Juillet 2008. Sabatier F., 2007. Le risque littoral et sa gestion sur les plages sableuses ouvertes. Littorisk. Arles le 23 novembre 2007. Invitation par la Région PACA.
Rapports et autres ouvrages	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 « <i>Le golfe du Lion</i> » (éd. A. Monaco, W. Ludwig, M. Provansal, B. Picon). : 123-134. Bioret F. & R. Mathevet, 2008. La gestion adaptative des territoires de la biodiversité. in L. Garnier (ed.), <i>Entre l'Homme et la Nature : une démarche pour des relations durables</i> . Réserves de biosphère, Notes Techniques n°3, UNESCO, Paris, pp.74-76. Coralie Calvet (2008). La gestion sociale de l'eau de l'île de Camargue : approche par la modélisation d'accompagnement. Mémoire d'Ingénieur des Techniques Agricoles, ESITPA, Rouen. Chauvelon, P., 2007. Constraints, limits and perspectives for Integrated Coastal Zone Management in the Rhone river delta. Proceedings of the The Eighth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment – MEDCOAST 07, E. Ozlhan (Editor), 13-17 November 2007, Alexandria, Egypt, pp247-255. 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.

Chauvelon, P., 2007. Gestion Intégrée d'une Zone humide littorale méditerranéenne aménagée : contraintes, limites et perspectives pour l'île de CAMargue (GIZCAM). Programme LITEAU 2, MEDAD, Tour du Valat, Rapport intermédiaire de recherche, Août 2007, 32 p + annexes.

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).

Leclerc S. Dynamique d'occupation du sol et caractérisation de l'évolution des habitats naturels du secteur des étangs inférieurs dans l'île de Camargue. Juillet 2008, Mémoire d'ingénieur ESGT.

Mannessiez Elsa 2007 Contributions au modèle de fonctionnement hydrologique du système des étangs centraux de Camargue et à l'étude des relations entre habitats et durées de submersion, Master II Environnement, Université de Provence.

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.

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).

Implication auprès des gestionnaires

- Réunions de coordination du projet GIZCAM impliquant les gestionnaires du Parc Naturel Régional de Camargue (PNRC) (25/01/2006, 14/06/06, 20/06/07, 27/02/08, 04/06/08, 23/09/08).

- Commissions de gestion de l'eau et des milieux aquatiques du PNRC (toutes depuis le début du Projet : P. Chauvelon, A. Dervieux) ; deux avec présentation en séance de résultats relatifs au projet (pesticides : S. Chiron, L. Comoretto ; érosion du littoral : O. Samat).

- Commission Exécutive De l'Eau (CEDE) : participation à toutes les réunions (A. Dervieux, P. Chauvelon) (de 4 à 10 par an), + réunions groupe de travail restreint (A. Dervieux).

- Groupe de travail « Gestion de l'Eau et du Littoral » pour la révision de la charte du PNRC, 10 réunions sur 2007-2008 (A. Dervieux, P. Chauvelon).

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 de surface hydro-salins et de matière en suspension associés aux échanges entre le système lagunaire et la mer 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 downdrift 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 gaz 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