

A - RECAPITULATIF DE LA PROPOSITION

« réponse à l'APR programme LITEAU 2 »

Gestion Intégrée d'une Zone humide littorale méditerranéenne aménagée : contraintes, limites et perspectives pour l'Île de Camargue. (GIZCAM)

Résumé de la proposition

La variabilité des forçages physiques naturels et anthropiques conditionnant l'évolution à court et moyen terme de l'hydrosystème de l'Île de Camargue, choisi comme objet d'étude, sont directement impactés par les changements globaux. Dans un contexte incertain, les gestionnaires doivent s'appuyer sur des bases de connaissances, des outils de simulation aussi opérationnels que possible, pour l'aide à la décision et la prospective. Plusieurs projets se sont succédés ou seront encore en cours en Camargue visant à mieux comprendre les processus physiques, biologiques, sociaux et leurs interactions. En prolongement et en complément des activités de recherche passées et en cours (MEDDEL, PNRZH, LITEAU 1, EUROSION, GICC-2), nous proposons ici la coordination de plusieurs axes de recherche ayant pour objectif de tendre vers une gestion intégrée de cette zone côtière. Il s'agit en premier lieu de finaliser le développement d'un modèle de simulation du fonctionnement hydrologique de l'Île de Camargue, calé sur des jeux de données complémentaires comblant les lacunes décelées lors de travaux antérieurs, de le rendre plus modulaire afin de pouvoir intégrer de nouvelles options de gestion hydraulique, que ce soit en fonctionnement normal ou critique. Cet outil qui devra pouvoir être utilisé par les gestionnaires, s'appuie en particulier sur des données générées par un Système d'Information Géographique (SIG). Des fusions de données et la mise en place d'un protocole de mise à jour utilisant l'imagerie satellitale seront effectuées sur la partie occupation du sol agricole, pour être transférées dans le SIG utilisé par les gestionnaires. Un SIG plus spécifique au secteur de transition endigué (lagunes et sansouïres) vers le milieu marin permettra une analyse historique de son évolution géomorphologique sur plusieurs décennies. 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, sera étudiée sur une base quantitative permettant le cas échéant de proposer de réviser les politiques d'aménagement côtier. Les flux de pesticides, depuis l'entrée sur le bassin versant ; et de sels à l'interface marine (de surface et souterraine) seront investigués par expérimentation de terrain et modélisation, pour établir des fonctions de transfert globales dans l'hydrosystème par couplage avec le modèle hydrologique. La gestion intégrée de l'Île de Camargue ne peut s'envisager sans prendre en compte les interactions entre les comportements humains à divers niveaux (décideurs, gestionnaires, exploitants, usagers, scientifiques...). Une étude sociologique empirique sera menée, visant la compréhension des actions, processus décisionnels, de leur impact sur le fonctionnement de la commission exécutive de l'eau (organe informel de concertation pour la gestion hydraulique de l'Île de Camargue). La simulation par modélisation Multi Agent orientée jeu de rôle, sera utilisée par adaptation d'un outil existant, pour animer la réflexion dans la recherche d'un compromis dans la négociation sur les règles de gestion durable des zones humides littorales.

Axe (s) de l'appel à propositions de recherche : 3. La Gestion Intégrée des Zones Côtières

Responsable scientifique (Chauvelon Philippe, CR1, Hydrologue, Fondation Sansouïre, Station Biologique de la Tour du Valat, tel 0490972013, fax 0490972019, chauvelon@tourduvalat.org).

Des équipes scientifiques compétentes dans l'étude et la modélisation du fonctionnement des zones humides, des processus et de l'évolution des milieux littoraux, de l'interface homme environnement.

FONDATION SANSOUIRE - Station Biologique de la Tour du Valat (SBTV), Arles
UMR 6635 CEREGE (Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de l'Environnement) (Universités d'Aix-Marseille 1 et 3)
UMR 6012 ESPACE, Equipe DESMID (CNRS, Université Aix-Marseille 2)
Université de Provence, Laboratoire de Chimie de l'Environnement
CNRS, CEFE, Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive, Montpellier
CETMEF Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales - agence d'Aix en Provence
CETE-Méditerranée, Aix-en-Provence

Des utilisateurs finaux en charge du suivi, de la gestion hydraulique, des espaces protégés et du littoral.

PNRC Parc Naturel Régional de Camargue
Commission Exécutive de l'Eau (DDAF, PNRC, RNC, Collectivités locales, Associations Syndicales, Agriculteurs, pêcheurs, scientifiques).
Comité de Delta
Réserve Nationale de Camargue

Articulation avec les programmes régionaux, nationaux et européens :

Ce projet s'inscrit dans le cadre d'une Zone Atelier (ORME). Il fonctionnera en synergie avec l'un des deux ORE axés sur l'interface continent –océan, l'ORE RESYST, dont plusieurs des équipes participantes sont dans le projet. Il valorisera des données inédites des équipes participantes. Il s'inscrit en complémentarité du projet IMPLIT (Programme GICC 2 du MEDD) et de travaux de recherches co-financés par la Région PACA et l'AERMC.

Budget prévisionnel total (T.T.C.) : 294046 €

Participation demandée (T.T.C.) : 135000 €

Organisme (s) cofinancier (s) :

MEDD Programme GICC2 (projet IMPLIT) : 50596 €

Fondation Sansouire (fonds propres) : 104747 €

CEREGE (fonds propres) : 3691 €

Organisme gestionnaire des crédits : Fondation Sansouire et CEREGE

Durée : 36 mois

B - DESCRIPTIF DE LA PROPOSITION

Exposé de la proposition

- Etat des questions sur le territoire, actions passées, cadre actuel de la demande

Dans l'hydrosystème aménagé de l'île de Camargue, les flux et échanges d'eau associés aux divers usages et au fonctionnement des écosystèmes sont contraints par le climat local, la gestion hydraulique et agricole, et par les conditions aux limites que constituent le fleuve et le milieu marin. Les volumes d'eau annuels importés dans le delta dépendent de l'étendue et de la localisation des zones cultivées en riz (avril à septembre). Le drainage agricole des secteurs non poldérisés pendant la saison estivale limite la diminution de volume d'eau et l'augmentation de salinité des étangs. L'intensité et la fréquence des vents à certaines périodes, favorisent la redistribution du sel et le transport des sédiments dans les étangs, ainsi que les échanges avec le milieu marin. Suite à des ruptures de digues des inondations partielles ont affecté l'île de Camargue (Octobre 1993, Janvier 1994). L'eau des secteurs inondés a en grande partie transité par les étangs avant d'être évacuée vers la mer, par gravité ou par pompage. Comme conséquence, une grande quantité de matières en suspension (MES) a été introduite, et le lessivage des étangs a causé une diminution forte et rapide de la salinité. Les écosystèmes lagunaires ont été fortement perturbés : régression importante des herbiers, modifications des peuplements piscicoles. Si les conditions de salinité initiales ont été retrouvées après 5 années, le retour à des conditions initiales pour l'herbier et les peuplements piscicoles a nécessité de 7 à 8 ans. Au cours des mois de juillet et août de la dernière décennie, les niveaux d'eau dans les étangs du sud non connectés à la mer étaient inférieurs au niveau marin 90 % du temps, cet état de fait, combiné à la concentration par évaporation, va dans le sens d'une salinisation accrue du système. Si les apports d'eaux de drainage contribuent à lisser les effets du climat sur les niveaux et salinité des étangs, ils entraînent un flux de polluants, en particulier de pesticides liés à l'agriculture sur le bassin versant. Ces flux et concentrations dans les divers compartiments de l'hydrosystème restent à quantifier. Durant la dernière crue majeure du Rhône, en décembre 2003, des ruptures de digues de l'île de Camargue ont pu être évitées de justesse, celles subies en amont d'Arles et sur la rive droite du Petit Rhône montrent qu'en dépit des travaux réalisés, le risque d'inondation par défaillance des ouvrages reste d'actualité. La défense du trait de côte est depuis plusieurs décennies un enjeu important de la conservation et du développement de ce territoire. Le problème de la durabilité des aménagements réalisés ainsi que leur pertinence, se posent, en particulier dans le contexte des effets du changement climatique sur les conditions hydro climatiques et météo marines contraignant le système. Entre protection accrue et adaptation graduelle, selon les enjeux associés de conservation, de développement, et les contraintes socio économiques, une réflexion globale s'amorce sur les conditions d'une gestion intégrée de cette zone littorale à forte valeur patrimoniale, en particulier dans le cadre du Contrat de Delta. Le devenir de ce territoire fortement anthropisé s'appuiera probablement sur des politiques alternatives d'aménagement et de gestion, devant s'appuyer sur des bases scientifiques comportant une analyse à la fois du comportement social des acteurs et des conditions physiques du développement.

En prolongement et en complément des programmes de recherche passés et en cours (MEDDELTA, PNRZH, LITEAU 1, EUROSION, GICC-2), nous proposons ici la coordination de plusieurs axes de recherche finalisée ayant pour objectif de tendre vers une gestion intégrée de cette zone côtière.

- Modes de coordination prévus avec les acteurs:

Au début du projet et périodiquement (tous les 6 mois au minimum) des réunions d'informations sur l'avancement du projet, et de concertation pour prise en compte des attentes des gestionnaires (en matière d'utilisation du modèle de simulation et de développement SIG notamment) seront organisées avec un comité de pilotage formé au sein des instances d'animation et de gestion existantes :

La commission hydraulique et gestion des milieux aquatiques du Parc Naturel Régional de Camargue (PNRC)

Le Comité de Delta

Le comité exécutif de l'eau (CEDE) qui sera à la fois utilisateur final mais aussi objet d'étude dans ce projet.

- Etat de l'art (et références bibliographiques internationales essentielles) sur la (les) question (s) traitée (s) :

Les hydrosystèmes aménagés peuvent être considérés pour la modélisation comme des systèmes complexes. L'utilisation d'outils de simulation utilisant le « declarative modelling », permettant de construire par modules successifs et assurant une certaine convivialité pour le développeur non spécialiste en programmation (Muetzelfeldt, 2004). Les expériences de modélisation réalisées en utilisant ce type d'outil ont concerné des bassins versant naturels (Hreiche et al., 2002) ou des hydrosystèmes très anthropisés (Argent et Houghton, 2001). L'augmentation des gaz à effet de serre, liée aux activités anthropiques, provoquera une hausse thermique importante à l'horizon de la fin du XXI^{ème} siècle. Les conséquences aux échelles régionales et sur les phénomènes rares sont incertaines. Les relations entre le changement climatique et les tempêtes sont jusqu'à présent très peu étudiées sous l'angle des risques naturels littoraux. La difficulté réside dans l'absence de séries statistiques des forçages climatiques et/ou houlographiques suffisamment longues pour pouvoir déterminer des conclusions solides (Komar, 2001). Durant la dernière décennie, les progrès réalisés dans la mesure de certains isotopes radioactifs à vie courte ont permis de mettre en évidence sur certaines zones côtières l'importance d'apports souterrains par diffusion à travers le sédiment (Burnett, and Dulaiova, 2003 ; Garrison et al., 2003 ; Tobias et al., 2001). Les traceurs les plus adaptés pour ces études sont les isotopes du radium et du radon (Burnett, and Dulaiova, 2003), appartenant tous aux chaînes de décroissance naturelle de l'uranium ou du thorium. Le radon, et notamment le ²²²Rn, est tout particulièrement adapté à ce travail. Le ²²²Rn est formé par décroissance du radium-226 présent dans l'eau sous forme dissoute. Sa demi-vie est courte (3,8 jours) et les activités mesurées dans l'eau répondent donc rapidement aux variations d'apports. Il est largement enrichi dans les eaux souterraines (où il est formé par décroissance du radium présent dans la roche encaissante) et il est inerte (gaz) et ne subit donc pas d'enlèvement par adsorption ou consommation biologique. Les utilisations multiples des zones humides sont souvent contradictoires et occasionnent des conflits entre les usagers dont les représentations des marais diffèrent (Rivière-Honegger, 1990 ; Picon, 1988). Il en résulte une dynamique des usages, une transformation des écosystèmes sous l'effet des aménagements, et finalement une dynamique de la biodiversité. La définition d'une gestion satisfaisante ne peut être réalisée sans une patrimonialisation des enjeux¹. Il s'agit de dépasser les compromis instables, par une volonté d'action commune. Les acteurs sont identifiés, et des débats ont lieu dans diverses structures, mais les étapes suivantes de la démarche patrimoniale ne sont pas toujours poursuivies (discussion sur des objectifs communs sur le long terme, choix des outils de gestion). Comment les institutions locales peuvent-elles développer une telle démarche ? Quelle place le scientifique doit-il occuper ? Si ce dernier doit informer, contribuer à la définition des objectifs et scénarios de gestion, il ne peut seul définir les solutions à privilégier. Les gestions pratiquées par les usagers, qu'elles soient pastorales et/ou hydrauliques, répondent à des objectifs socio-économiques qui sont susceptibles d'être déterminants dans les choix. Ce contexte socio-économique ne peut être occulté lorsqu'il est question de reconsidérer les gestions en vigueur. *A contrario* il est essentiel de préserver les fonctions et valeurs des zones humides. La réappropriation sociale de l'ensemble des enjeux passe donc par une meilleure circulation de l'information, seul moyen susceptible de sensibiliser les usagers à l'importance des zones humides et de leur diversité, au-delà de la simple valeur d'usage. Nous nous intéressons à la

¹ Dans le contexte d'une gestion pluri-acteurs, l'approche patrimoniale développée dans les pays en voie de développement et dans d'autres régions françaises pourrait être une réponse appropriée (Babin *et al.*, 1999 ; Ollagnon, 1989). La mise en place d'une telle démarche se heurte cependant aux obstacles liés aux droits de propriété. Tout gestionnaire de marais sera en effet enclin à s'opposer aux changements susceptibles de réduire ses opportunités de profits. Face à ce risque la contractualisation est un outil souvent efficace, selon l'échange d'informations pratiqué, et l'importance de la phase de négociation que constitue l'élaboration de règles communes de gestion.

problématique de la co-viabilité des systèmes écologiques et sociaux à travers l'étude des modes d'accès aux ressources naturelles et la gestion des interactions entre ressources et usages. Dans ce cadre nous abordons également la question de la modélisation comme support aux processus collectifs de décision en situation complexe : la *Companion Modelling Approach* (Bousquet et al., 1999,). Notre démarche est fondée sur une approche spatiale et localisée des phénomènes naturels et socio-économiques. Nous proposons de considérer le territoire comme un système écologique et social (SES). Dans le cadre de cette recherche nous nous intéressons aux zones humides camarguaises, aux interactions des individus (ou groupes sociaux) et de cet espace particulier. De nombreuses études ont montré que les zones humides sont à la fois un enjeu et un produit de pouvoir de la part des usagers (chasseurs, agriculteurs, éleveurs, protecteurs...). La zone humide, est alors conçue comme un espace-ressource, aménagé et valorisé, approprié par les individus ou groupes sociaux. En associant à ce corpus théorique les concepts de résilience et de cycles adaptatifs développés par Holling (1973), Gunderson (2000), Perrings (1998), Walker et al. (2002), il est possible d'établir les liens entre la dynamique des écosystèmes, et en particulier, les caractéristiques de leur résilience, et la dynamique économique et sociale des groupes humains qui leurs sont liés dans une perspective de développement durable (Folke et Carpenter, 2002).

- Site choisi, position par rapport aux chantiers PNEC :

Le système lagunaire de l'Ile de Camargue ne fait pas partie du chantier Lagunes Méditerranéennes du PNEC, ce projet lui sera donc complémentaire. Relativement aux thèmes du PNEC, il s'articule en particulier au sein des thèmes 1 **Influences climatiques et anthropiques**, et 4 - **Politiques publiques littorales et patrimoine côtier**.

- Références bibliographiques commentées sur le (s) site (s) choisi (s) traitée (s) :

Depuis 1993 ont été entrepris dans un cadre pluridisciplinaire des recherches sur le fonctionnement hydrologique et hydraulique de l'hydrosystème camarguais. Les travaux engagés à la Station Biologique de la Tour du Valat (SBTV) ont été effectués en collaboration (UMR Hydrosiences, Institut des Sciences de l'Ingénieur de Montpellier, DESMID, ORE RESYST), en maintenant des relations étroites avec les gestionnaires du territoire (PNRC, RNC, Centre Français du Riz, Associations Syndicales.). Les outils de simulation développés s'appuient sur des modèles physiques déterministes (Hydrodynamique) et des modèles conceptuels intégrant le fonctionnement hydro salin de surface. Ce projet vient prolonger le volet hydrologie Camargue du PNRZH (1997-2000) (Chauvelon, 1998 ; Chauvelon et al, 2001), les travaux sur l'interface hydraulique mer-étang du programme LITEAU 1 (2000-2003) (Rosecchi et al, 2003) et le volet modélisation hydrologique du programme Lagune de la SBTV (2001-2005) centré sur le système Vaccarès (Chauvelon et al, 2002, Chauvelon et al, 2003). Dans ce cadre et en partenariat avec l'ORE RESYST, de nouveaux suivis hydrologiques sont mis en place concernant les flux de sels entre les étangs et l'interface souterraine mer-delta, ainsi que sur les flux de pesticides (Comoretto et al., 2004 ; Comoretto et Chiron, 2005) dans l'hydrosystème depuis fin 2003. Le littoral de Camargue entre le Petit et Grand Rhône est équipé de structures de protections côtières en enrochement (hard ingénierie) depuis la fin des années 70. Ces structures sont censées protéger les 2 pôles socio-économiques de la Camargue : la Compagnie des Salins du Midi et la commune des Stes Maries de la Mer (Suanez et Sabatier, 1999). Cependant, leur efficacité est aujourd'hui débattue car les ouvrages utilisés ont permis de ralentir au bloquer le recul du rivage (Sabatier et Suanez, 2003), mais l'érosion des fonds demeure. Cette érosion met, à terme, en danger de basculement les enrochements. A ce jour, la seule étude réalisée sur ce thème à partir de relevés bathymétriques fiables concerne une digue (Véran) localisée devant les terrains des Salins (Samat et al., 2004 ; accepté). Une démarche similaire doit être entreprise devant les Saintes Maries de la Mer car ici, en cas de rupture et d'effondrements d'ouvrages, les dégâts matériels (et peut être humains) pourraient être importants. La dernière tempête vingtenale de 1997 en a d'ailleurs montré les dangers car un tiers de la ville s'est vue inondée, des ouvrages se sont affaissés et des vitrines de commerces en front de mer ont été détruites. Il est donc urgent dans ce secteur d'évaluer l'érosion des fonds et de modéliser la force de la houle durant les tempêtes les plus sévères. Les ouvrages en

enrochements bloquent aussi le transit littoral et créent une érosion en aval dérive. Ce processus met en danger la partie ouest des Saintes Maries de la Mer et des simulations historiques ont montré que le recul du rivage pour 2030 pourrait affecter les étangs inférieurs (Sabatier et Provansal, 2002). Au niveau des Salins, le même processus d'érosion limitrophe aux ouvrages se pose sans qu'il n'ait été évalué. Après 20 années d'une politique de protection côtière sur la base des enrochements, il est donc crucial aujourd'hui d'estimer les impacts perpendiculaires et longitudinaux des ouvrages afin de proposer un diagnostic de leur efficacité, établir les éventuelles erreurs commise afin de proposer des outils pour ne plus les renouveler.

- **Méthodologie :**

Action 1. Modélisation hydrologique et hydraulique de l'Ile de Camargue

Action 1.1 Analyse données climatiques et hydrométriques – scénarios

Les jeux de données complémentaires acquis depuis 2002 (limnigraphes sur les trois sous unité lagunaires, jaugeages dans les passes) vont permettre de procéder à de nouvelles opérations de calage et validation d'un modèle hydrodynamique sous une gamme variée de conditions de niveaux et de vent. Cette étape est importante, car c'est elle qui fournit en grande partie par ses résultats, les données nécessaires à la génération de fonctions d'échanges hydrauliques entre Vaccarès et étangs inférieurs, lesquelles sont essentielles dans le modèle conceptuel global (HIC).

Dans l'analyse de l'aléa couplé crue, surcote marines : conditions aux limites du système, il s'agit :

1. de définir une méthodologie de calcul et une réponse quantifiée à l'aléa couplé submersion marine / crue du Rhône dans le delta.
2. de fournir les conditions aux limites aux modèles hydrologiques de gestion de l'hydrosystème lagunaire deltaïque de Camargue, notamment pour la modélisation de l'intrusion saline.

Ce projet s'inscrit dans la continuité du programme de recherche IMPLIT (Impacts des événements extrêmes – tempêtes et surcotes – liés au changement climatique sur les hydrosystèmes du littoral méditerranéen français) retenu par l'APR GICC 2 du MEDD et piloté par le CEREGE, dans lequel le CETMEF est également partenaire.

Pour le littoral camarguais on recense plusieurs séries marégraphiques (Saintes Maries de la Mer, Marseille, Grau de la dent, ...).

Le marégraphe de Marseille dans l'Anse Calvo (Endoume), en service depuis février 1885 fait partie du réseau du GLOSS (Global Sea Level Observing System) et constitue l'une des plus anciennes chroniques au monde.

Approche statistique :

A partir d'une enquête auprès des gestionnaires et exploitants du littoral réalisée dans le cadre du projet IMPLIT, l'étude consistera à valider les enregistrements de limnigraphie sur les deux bras du Rhône et de marégraphie côtière, extraire de la donnée brute la marée astronomique et analyser en fréquence le régime des crues et des surcotes (Walton T. L. [1999]).

Une analyse stochastique de l'aléa couplé surcote/crue – décote/étiage sera réalisée par calage de loi bivariées en utilisant l'expérience acquise en hydrologie continentale (Mousavi S. [1997]) pour l'étude des caractéristiques hydrologiques conjuguées (modèles Farlie, FGM, Hashino, ...) Les variations absolues du niveau de la mer et limnimétrie Rhône sont considérées comme des variables aléatoires et traitées par échantillonnage (max. annuel ou valeurs supérieures à un seuil) pour en estimer la concomitance.

Approche déterministe :

Afin de préciser la distribution géographique des variations de niveau d'eau sur l'ensemble du domaine océanique et lagunaire de la région, le projet étudiera la propagation d'une onde de surcote et d'une onde de crue concomitante avec le modèle TELEMAC 2D pour étude crue-surcote.

L'objectif de cette partie est d'aboutir à une cartographie de l'aléa couplé inondation fluviale/surcote marine et décote/étiage par modélisation de l'influence aval des niveaux marins dans le delta.

L'ensemble des données limnimétriques (CNR) et bathymétriques sont disponibles pour réaliser ce travail (BCEOM [2001]).

Action 1.2 Modification structure modèle de simulation hydrologique

L'opérationnalité du modèle de simulation globale de l'hydrosystème (HIC : Hydrologie de l'Ile de Camargue ; Chauvelon et al., 2003) est jusqu'alors limitée par la disponibilité en données fiables et concomitantes sur 3 aspects majeurs de son fonctionnement :

1) la dispersion spatiale des opérations de gestion hydraulique et leur manque de contrôle (introductions d'eau pour la riziculture et donc volumes de drainage potentiels, transferts d'eau inter bassins, gestion du pertuis maritime).

2) La complexité du fonctionnement hydrodynamique du système lagunaire (géomorphologie compliquée et à évolution rapide, fonctionnement « impulsif » sous l'effet de forts coups de vent).

3) la difficulté d'intégrer à cet outil de modélisation les flux salins souterrains à l'interface mer – étangs.

Dans sa version actuelle, le fonctionnement des bassins versants n'est pas modélisé complètement au sein du modèle conceptuel global, mais estimé à partir des séries de débits mesurées sur le Fumemorte. L'extrapolation au BV total est réalisée à partir des caractéristiques hydrauliques et d'occupation du sol (données générées dans un SIG). Le modèle de fonctionnement du BV est en cours de développement. Sous réserve de données fiables concernant la gestion des vannes du pertuis, la méthode de quantification des échanges hydrauliques (et de sel) de surface entre les étangs et la mer est opérationnelle.

Pour développer le modèle conceptuel intégré, le logiciel Vensim™ a été utilisé. Vensim™ est un outil de modélisation visuel qui permet de conceptualiser, documenter, simuler, analyser et optimiser des modèles de systèmes dynamiques. Il s'agit d'un outil de modélisation à la programmation orientée objet (évolution des logiciels Stella et Ithink), à l'interfaçage relativement convivial, possédant nombre de fonctions et procédures d'intégration (différences finies, Euler, Runge Kutta), ainsi que des procédures d'optimisation (Powell, avec ou sans utilisation d'un filtre de Kalman).

Le modèle HIC de base devrait avoir atteint un niveau d'opérationnalité acceptable d'ici deux ans. Il ne faut évidemment pas s'attendre à modéliser le niveau des étangs à 2 cm près et la salinité à 1 g/l près au pas de temps journalier dans chaque étang sur de longues périodes. Mais plus raisonnablement à simuler le comportement possible dans différents contextes hydro-climatiques en terme de niveaux et salinité avec une précision de l'ordre de 20 % en moyenne en agglomérant les résultats au pas de temps mensuel. Il s'agit d'un outil de simulation pour la recherche, que nous souhaitons transférer vers les gestionnaires pour une aide prospective à la décision sous certaines conditions. Il est envisagé de fournir une version « semi ouverte », à partir de l'outil logiciel VENSIM (ou éventuellement SIMILE), exécutable facilement en utilisant des fichiers de données d'entrée préétablis, correspondant à des scénarii plausibles moyens ou extrêmes ; à partir de conditions initiales fixées par le gestionnaire.

Un axe important du développement du modèle HIC consistera à le rendre plus modulaire concernant les options de gestion hydraulique : inclure la possible poldérisation des bassins actuellement drainés gravitairement et la « dépoldérisation provisoire » lors de situations de crises ou de gestion

hydraulique négociée, de tout ou partie des bassins; inclure la mise en place de moyens de pompes supplémentaires directement sur les étangs, et la possibilité de transfert d'eau du Rhône en période de crue. Pour des périodes courtes ou les variables forçantes sont clairement établies (pas de riziculture, des crues plus ou moins fortes sur le BV, des introductions d'eau accidentelles depuis le Rhône ou une capacité limitée pour évacuer l'eau pluviale du delta due au niveau du fleuve, un niveau marin élevé), il est envisageable de développer à partir de HIC, un outil pour faire des simulations des variations de volumes donc de niveau (en ne se préoccupant pas de bien simuler le comportement salin du système dans ce cas), utilisable au pas de temps journalier. Cet outil pouvant être utilisé en situation de crise pour aider à la prise de décision. On analysera les conditions limites de gestion hydraulique du milieu dans un contexte hydro-climatique extrême (en s'appuyant notamment sur les jeux de données acquis en 2003), pour une réflexion sur les aménagements et/ou règles de gestion hydrauliques à prévoir en réponse aux effets prévisibles du changement climatique.

Action 1.3 Simulations – Analyse de sensibilité

Action 1.4 Préparation modèle pour utilisateur final

La concertation prévue en cours de développement permettra de fournir un outil aussi convivial que possible, l'interface utilisateur n'étant cependant pas la priorité dans le projet.

Action 2. Analyse spatiale - Système d'Information Géographique

Action 2.1 Dynamique spatiale du bassin versant – SIG

Notre objectif sera de développer un système d'information à référence spatiale permettant l'inventaire, le suivi et l'étude des dynamiques de l'occupation du sol de Camargue (Ile de Camargue, Petite Camargue et le Plan du Bourg) utile aux gestionnaires locaux. Une version du SIG sera consultable et utilisable par le biais d'un site internet. Les données spatialisées seront visualisables et téléchargeables (format HTML). La base de données intègrera l'occupation du sol pour les années 1991, 1996 et 2001 de l'inventaire réalisé par le PNR. La base de données du parcellaire cultural réalisée par la Station Biologique de la Tour du Valat servira de base au système d'information pour le suivi agricole.

Une mise à jours sera réalisée pour chaque année depuis 2002 en complément des années 1991, 1996 et 2001. La mise à jours sera réalisée grâce à l'utilisation d'images satellitaires classifiées. Ces images classifiées seront intégrées dans le système d'information et viendront renseigner les différentes entités vectorielles (parcelles agricoles, habitats naturels, ...). L'information concernant le suivi agricole sera récoltée au niveau de la parcelle culturale. Une base de données historique sera consultable pour chacune des 18000 parcelles de Camargue.

Par le biais d'indices empruntés à l'écologie du paysage ou bien calculés à partir des données satellitaires, des indices concernant par exemple la biomasse (NDVI) seront calculés et compléteront les tables attributaires de la couche d'information liée à l'occupation du sol. Ces indices permettront la réalisation d'études diachroniques non pas seulement en terme thématique mais aussi à l'échelle intra-thématique. Cette information permettra de localiser les sites où l'on observe des diminutions ou augmentations de superficies des habitats mais aussi par conséquent de l'évolution interne de ces mêmes habitats (biomasse, fragmentation, ...).

Action 2.2 Evolution morphologique récente du système lagunaire

Un système d'information à référence spatiale sera réalisé sur le système des Etangs Inférieurs. Ce système permettra la réalisation d'études sur la dynamique morphologique des Etangs.

Cette étude sera réalisée grâce à des mosaïques d'orthophotographies géoréférencées des années 1953 à 1998 (voire 2003, si accès à la BD Ortho Num 2003) sur lesquelles seront digitalisées les contours des étangs. Les données bathymétriques recueillies par la RNC seront intégrées au système d'information.

Une étude de la dynamique morphologique sur les cinquante dernières années sera réalisée sur les Etangs Inférieurs. Les limites des étangs seront numérisées sur les orthophotographies. Cette étude de l'évolution de la morphologie des étangs permettra de localiser les zones de sédimentation et les zones d'érosion. Les questionnaires auront une vision rétrospective de l'évolution du système. Cette connaissance permettra d'envisager des scénarii de gestion prospectifs intégrant les dynamiques morphologiques à fin de protéger certains écosystèmes menacés du fait de modifications de variables physiques. Le SIG permettra de croiser les différentes couches et de cartographier les zones d'érosion et de sédimentation. Les données bathymétriques permettront le calcul des superficies et volumes en eau. Ces données pourront, être exploitées en comparaison avec de nouvelles données permettant ainsi l'étude des dynamiques sédimentaires permettant des calculs volumiques.

Les images générées pour l'étude des dynamiques morphologiques permettront également de cartographier la couverture végétale sur les cinquante dernières années. Pour les années plus récentes, depuis 2001, les indices générés dans la première partie seront également utilisés pour caractériser les dynamiques récentes de la végétation (biomasse, fragmentation ...).

La quantification de l'évolution actuelle des processus morpho sédimentaires dans le secteur des étangs inférieurs apparaît importante car c'est un facteur intervenant 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).

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, par suite sur la dynamique saline et donc ses conséquences sur l'écosystème aquatique, son exploitation et sa pérennité

Action 2.3 Finalisation SIG utilisateur

Action 3. Flux et transfert dans l'hydro système

Action 3.1 Flux et transfert de pesticides

Dans le cadre de la thèse de Laetitia Comoretto, le LCE a mis au point les méthodes analytiques nécessaires pour l'analyse de plus de 40 molécules phytosanitaires, incluant les molécules parents et leurs produits de dégradation. Ces compétences analytiques ont permis de réaliser une vaste campagne d'acquisition de données sur la Camargue durant l'année 2004. De nouvelles campagnes de mesures sont indispensables pour déterminer les niveaux de pollution par les pesticides et évaluer leur variabilité spatiale et temporelle sur l'île de Camargue. Il est proposé dans le programme Liteau d'augmenter le pas de temps des prélèvements actuellement réalisés par le LCE (bimensuels) afin d'affiner l'expertise proposée sur les sources de pollution internes et externes au delta (apport fluvial, retombées atmosphériques, riziculture), et sur leurs variabilités. Ces valeurs seront interprétées en fonction du contexte hydraulique particulier de la Camargue et des pratiques agricoles. La riziculture nécessite un fort apport d'eau du Rhône pour l'irrigation. De plus l'épandage des molécules phytosanitaires dans des parcelles en eau favorise dans certains cas leur transfert latéral rapide vers les canaux de drainage puis vers le milieu récepteur, l'étang de Vaccarès pour les zones drainés par les canaux de Fumemorte et Roquemaure Les valeurs de concentration en pesticides mesurées au Laboratoire seront complétées par des mesures du débit. Les flux ainsi calculés permettront d'établir des bilans de masse à l'échelle des grands bassins versants de Camargue.

Ces données seront reprises dans un modèle mathématique. Il s'agit de modéliser le flux de pesticides transitant dans la Camargue. L'étude des relations entre les flux de pesticides et les débits permettra d'apprécier si le débit procure une assez bonne prévision des apports annuels de pesticides à l'étang du Vaccarès. L'étude de la biogéochimie des polluants inclut l'étude des mécanismes qui contrôlent leur réactivité, leur spéciation et leur transfert. Les connaissances acquises dans ce domaine permettent la mise au point d'un modèle chimique. Le temps de résidence des eaux d'un delta est défini comme le temps nécessaire au renouvellement des eaux douces de la totalité du delta. Ce temps de résidence

détermine l'échelle de temps pour le transport de l'eau à travers le delta et par conséquent, le temps disponible pour la dégradation physico-chimique et biologique des pesticides. La détermination des flux nets demande le couplage du modèle chimique avec le modèle hydrodynamique.

Les valeurs de concentration et de flux mesurés et simulés constitueront un outil d'aide à la décision pour la gestion du milieu, pour cerner l'impact des pratiques culturales et pour l'optimisation d'un réseau de mesure de la qualité des eaux à coûts réduits (rationalisation du nombre de points de prélèvement, ciblage des molécules à rechercher).

Action 3.2 Flux de sel par diffusion souterraine

L'approche conceptuelle pour déterminer les flux hydrosalins souterrains à partir des apports de ^{222}Rn dans la zone côtière est la suivante :

- 1 - mesures en continu des activités de ^{222}Rn dans l'eau (à différentes profondeurs), de la température de l'eau et de l'air, de la vitesse du vent et des concentrations atmosphériques en ^{222}Rn . Mesures de l'activité de l'isotope père le ^{226}Ra dans l'eau pour estimer la quantité produite in situ.
- 2 - Calcul de l'excès de ^{222}Rn par comparaison avec la production interne (issue du ^{226}Ra) et les échanges avec l'atmosphère (ceux-ci sont gouvernés par la diffusion moléculaire et donc des processus physiques comme la vitesse du vent).
- 3 - Lorsqu'un excès de radon est observé, il est associé à un flux issu du sédiment sous-jacent. Pour être converti en « flux d'eau », il faut estimer la quantité de ^{222}Rn contenue dans l'eau interstitielle du sédiment sous-jacent à partir de mesure directe de cette eau ou d'équilibration du sédiment.

Le flux d'eau entrant (m/s) est alors calculé en divisant le flux de radon en excès ($\text{Bq}/\text{m}^2/\text{s}$) par l'excès de ^{222}Rn observé dans ces eaux interstitielles (Bq/m^3).

Afin d'estimer les apports d'eaux souterraines dans le système des étangs du Vaccarès, nous proposons de réaliser cette étude sur les trois principaux étangs.

Les données de ^{222}Rn seront acquises à l'aide d'un appareil (RAD-7) qui nous permet de faire des mesures en continue. Les mesures de ^{226}Ra seront réalisées avec cet appareil ou par Spectromètre de masse à thermo ionisation.

La mesure peut se faire au cours d'une campagne de plusieurs jours qui seraient menés sur les principaux étangs du système. Si la campagne est réalisée à un moment où les échanges sont minimum, les apports dans les différents étangs peuvent être estimés. Si les échanges de surface sont assez fort, soit nous devons travailler en globalisant le système des étangs, soit nous devons voir si chacun d'eux à une signature bien particulière. Deux campagnes de mesures seront réalisées.

Action 3.3 Couplage avec modèle hydrologique

Action 4. Protection côtière et dynamique littorale

Action 4.1 Analyse du recul du rivage et de l'érosion sous marine

Les méthodes se baseront sur des relevés de terrain, l'analyse de photographies aériennes et de la modélisation. Pour les 2 sites (Stes-Maries de la Mer et Salins de Giraud), la méthodologie sera identique :

1. analyse du recul du rivage (mètre et m^2) par traitement d'images diachroniques traité sous SIG (MapInfo) (Les données acquises antérieurement par le CEREGE (Sabatier et Suanez, 2003) seront utilisées sans être facturée hormis pour 1 relevé de la position du rivage par DGPS durant l'étude).
2. analyse de l'érosion sous marine devant les ouvrages par relevés bathymétriques, traitement sous Surfer et/ou ArcView. Les données bathymétriques acquises antérieurement par le CEREGE seront utilisées sans être facturée hormis 1 campagne bathymétrique qui sera réalisée pour l'étude.

Action 4.2 Modélisation de la force de la houle

Une simulation de la force de houle pendant les tempêtes sera réalisée en se basant (1) sur une houle cinquantennale et (2) les bathymétries de 1980 et celle réalisée pour l'étude afin de déterminer la conséquence de l'érosion des fonds sur la propagation et la force de la houle devant les ouvrages. Cette modélisation concernera uniquement la zone des Stes Maries de la Mer, aux enjeux socio-économiques les plus forts. La propagation de la houle sera réalisée sous SWAN (TU-Deft) qui est à ce jour l'un des modèles de propagation de la houle en zone côtière le plus performant. Il a été testé et calé par le CETE-Méditerranée lors de la phase Liteau 1 (Moratello et al., sous presse ; Meftah et al., sous presse) ce qui permettra de valoriser les résultats et les compétences acquises antérieurement.

Action 5. Analyse des processus décisionnels, gestion concertée, modélisation Multi Agents

Action 5.1 Analyse sociologique de la gestion hydraulique de l'Île de Camargue :

La commission exécutive de l'eau et la gestion des ouvrages hydrauliques dans l'Île de Camargue

Les choix de gestion des zones humides littorales sont confrontés de manière croissante à l'avis des usagers. C'est le cas en Camargue où s'ajoute aujourd'hui, aux préoccupations portant sur les interrelations entre activités humaines et protection de la nature, les inquiétudes face au risque inondation. Depuis les inondations de 1993-1994, et après trois années de crues importantes du Rhône avec les conséquences catastrophiques de celle de décembre 2003, la crainte du risque prend une dimension considérable et pourrait apporter des changements dans la manière dont sont abordées les questions de la gestion des lagunes et des échanges avec la mer. Ces préoccupations touchent les gestionnaires et les décideurs comme la population locale et les usagers. La Digue à la mer, équipée d'un seul pertuis fonctionnel en permanence (La Fourcade), protège la Camargue des tempêtes marines. Sa gestion reflète les mentalités et conflits du moment (rapport SEAH) et peut être révélatrice de l'inquiétude vis-à-vis de possibles inondations, qui prendrait le pas sur une gestion raisonnée au bénéfice de l'ensemble des activités humaines.

Les décisions de gestion, qui peuvent avoir des conséquences contradictoires, sont discutées et décidées au sein d'une Commission exécutive de l'eau (CEDE), organe informel dirigé par le DDAF et pilotée par le PNRC. Elle inclut des acteurs de l'eau, des représentants des collectivités locales, des gestionnaires de l'environnement et des chercheurs. Son travail est veiller au « bon équilibre » concerté entre niveau d'eau et salinité des étangs et décide de la gestion des flux. Les incertitudes qui pèsent sur ces décisions sont le résultat des lacunes de connaissance : flux piscicoles incertains, méconnaissance des remontées de sel par le coin salé et surtout l'imprévisibilité des aléas climatiques, induisent une gestion empirique ajustée aux préoccupations du moment.

Méthodologie

Notre proposition est de compléter les travaux menés au sein de SEAH jusqu'à 1998 au moyen d'enquêtes. La méthodologie est basée sur la participation aux réunions de la CEDE (enquête participative, 3 à 4 réunions en fonction des besoins), des entretiens auprès des membres de cette commission, des acteurs concernés et d'habitants, pour préciser la perception du rôle de la CEDE et de la gestion de la Digue à la mer.

Une observation du fonctionnement du pertuis de la Fourcade est également envisagée (réalité de la gestion en regard des préconisations générales). L'hypothèse de travail à vérifier est celle d'un possible changement de mentalité vis-à-vis des problématiques de gestion et d'une influence croissante des usagers. Il s'agira aussi de tenter d'évaluer l'efficacité ou la non-efficacité supposée de cette gestion au regard des positions des représentants des activités, et des gestionnaires. On tentera de vérifier enfin si face au risque d'inondation, les comportements ne tendraient pas à s'harmoniser et faire bloc, le souci général prioritaire devenant celui du risque.

Action 5.2 Gestion concertée en zone humide littorale: approche par le jeu de rôles

L'objet de la réflexion proposée à travers cette approche est d'identifier les conditions d'un compromis entre usagers respectant le caractère de l'écosystème, évitant sa fragmentation et protégeant durablement les ressources naturelles tout en assurant ou développant leur activité. Il s'agit de rechercher les conditions fonctionnelles, institutionnelles et les politiques publiques permettant de garantir une gestion durable de la zone humide littorale. Ces conditions sont à rechercher dans l'élaboration d'une représentation commune de son fonctionnement, d'une organisation collective locale soutenue par des incitations publiques et susceptibles de s'adapter à des conditions économiques nouvelles. Pour approcher une solution, il est important de considérer que les interactions stratégiques entre acteurs se produisent à deux niveaux : (i) celui de la gestion des niveaux d'eau et de salinité au cours de l'année, (ii) celui de l'aménagement de l'espace par la création de digues et de pompes privées. Les conflits non résolus sur le premier niveau peuvent induire des comportements de sortie de l'action collective se traduisant de fait par une modification de la nature même de l'écosystème (deuxième niveau). En retour, la modification de l'état de l'écosystème affecte les valeurs d'usage direct et les valeurs d'usage indirectes, notamment dans la mesure où l'écosystème lui-même est modifié par les aménagements.

Si la démonstration et l'étude des relations causales influençant la perte de biodiversité demeure difficile (Forester & Machlis, 1996), le développement de modèles à différentes échelles (continent, nation, région, habitat...) a montré l'intérêt de l'outil de modélisation en terme de prospective et de théorie (Mathevet, 2000). Ces cas révèlent également la nécessité des approches pluridisciplinaires pour reconnecter les dégradations environnementales à leurs causes socio-économiques. Le jeu de rôles basé sur une modélisation couplée de la dynamique sociale et de la dynamique de l'écosystème apparaît comme un outil innovant pour faire prendre conscience des interactions entre règles d'usage à court terme et dynamique de transformation de l'écosystème sous l'effet des stratégies d'adaptation des différents usagers à ces règles elles-mêmes (participant ainsi à un processus d'apprentissage collectif). Dans le cadre du projet Life-Nature, destiné à améliorer la gestion des roselières pour la conservation du Butor étoilé (*Botaurus stellaris*), plusieurs outils pédagogiques sont développés. Parmi ceux-ci un jeu de rôles assisté par ordinateur appelé *ButorStar* (Mathevet et al., 2005). Un modèle multi-agents, développé sur la plateforme de programmation CORMAS² et développé avec VisualWorks, un environnement de programmation en langage orienté-objets SmallTalk (Bousquet *et al.*, 1998), permet de simuler les effets à court et long terme de la gestion d'une roselière résultant des décisions prises par des éleveurs, récoltants de roseau, chasseurs, pêcheurs et naturalistes. Ce modèle repose sur une représentation spatiale d'une zone humide archétype constituée d'un paysage virtuel divisé en deux propriétés, l'une privée, l'autre communale, toutes deux interdépendantes d'un point de vue hydrologique. Chaque propriété est divisée en huit unités de gestion. Celles-ci peuvent être endiguées par les joueurs s'ils souhaitent s'affranchir des contraintes hydrauliques du voisinage. Différents 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 propriété et des unités de gestion. Ces décisions sont le résultat d'une négociation entre les différents joueurs. Elles sont intégrées dans le modèle par le maître de jeu. Leurs effets sur l'occupation du sol, sur la présence et la distribution spatiale, des oiseaux sont simulés par l'ordinateur. De même, les coûts et gains des différents joueurs sont automatiquement calculés. Ce jeu de rôles est conçu pour sensibiliser les étudiants à la conservation de l'avifaune et à l'usage rationnel et raisonné des roselières. Il est également destiné à fournir le support d'une réflexion collective aux usagers pour une gestion durable de leur roselière. La trentaine de tests réalisés à ce jour avec des étudiants, des usagers, des gestionnaires d'espaces naturels protégés et des scientifiques a montré que les objectifs assignés étaient atteints (Mathevet et al., 2005). Nous réaliserons une adaptation du jeu de rôles *ButorStar* au contexte de la gestion de l'Ile de Camargue. Il s'agira en particulier d'intégrer dans le modèle multi-agents le sel et la dynamique des milieux salés tels que les sansouires. Nous proposerons à l'aide de cet outil une série de séances de mise en situation

² Common-pool Resources and Multi-Agents System, plateforme générique de simulation multi-agents qui regroupe les fonctionnalités spécifiques au problème de la gestion des ressources naturelles en focalisant sur les interactions dynamique écologique ↔ dynamique sociale.

des usagers de la zone humide afin de tester ensemble des scénarios de politiques publiques afin d'évaluer leurs effets tant écologiques que socio-économiques à trois niveaux spatiaux : celui de la parcelle, de l'exploitation et celui du territoire dans son ensemble. Pour cela nous mettrons en place un processus itératif d'échanges et de discussion avec les usagers autour des propositions de scénarios et des résultats de simulations. Ce processus de co-apprentissage devrait contribuer au partage des connaissances du fonctionnement du système par les usagers, les scientifiques et les décideurs locaux. Nous insisterons particulièrement sur les propriétés de résilience et les incertitudes quand à la dynamique des transformations. Ceci place au cœur de la problématique les processus d'apprentissage.

- **Résultats attendus :**

Pour l'action 1, le livrable sera un modèle de fonctionnement hydrologique de l'hydrosystème Ile de Camargue permettant au gestionnaire de réaliser des simulations pour une gamme variée de conditions initiales et aux limites, et de scénarii hydroclimatiques, que ce soit pour la prévision à moyen terme, la prospective ou la gestion de crise.

Le couplage de ce modèle avec les résultats de la modélisation des transferts de pesticides dans l'hydrosystème permettra de quantifier les flux et temps de résidence. Les résultats des expérimentations sur les flux souterrains vers les étangs devraient permettre d'ajouter au modèle de fonctionnement hydrologique un module conceptuel de flux de sels.

Un outil SIG couvrant à la fois la dynamique de l'occupation du sol des milieux agricoles et habitats naturels sur les bassins versant, dont la mise à jour se fera par intégration d'images satellitales sera transféré aux gestionnaires.

Le SIG développé sur les étangs inférieurs permettra de croiser les différentes couches et de cartographier les zones d'érosion et de sédimentation. Les données bathymétriques permettront le calcul des superficies et volumes en eau (contribuant à l'amélioration du modèle hydrologique). Le système d'information sera un véritable tableau de bord de l'état des écosystèmes camarguais.

L'étude sur l'impact et le devenir des ouvrages « hard » de protection côtière en Camargue permettra de réaliser un diagnostic de l'efficacité des ouvrages et de déboucher sur des préconisations en matières d'ouvrages en enrochements.

L'approche gestion concertée – jeux de rôle proposée est de nature à éclairer la décision publique sur le choix des méthodes et procédures pour répondre aux enjeux de protection et de gestion durable des écosystèmes anthropisés. Elle peut également fournir aux acteurs impliqués localement dans leur gestion une voie pour rechercher un compromis dans la négociation sur les règles de gestion durable des écosystèmes. Elle est également reliée à la mise en œuvre de la politique de l'eau et du littoral. Les résultats pourront être valorisés d'une part au plan local et d'autre part à l'échelle nationale et méditerranéenne. Le territoire camarguais est classé pour partie en Réserve de Biosphère de l'UNESCO. Les résultats de cette recherche intéressent d'ores et déjà l'équipe en charge de la révision de la charte ainsi que nos partenaires institutionnels de chaque entité géographique du Grand Delta du Rhône (Syndicat Mixte de Petite Camargue gardoise, PNR de Camargue et l'association des Amis des marais du Vigueirat en charge de la gestion du site protégé du conservatoire du littoral à l'est du delta). La modélisation devrait permettre aussi de dégager des éléments théoriques quant aux phénomènes de transfert d'échelle extrapolables à d'autres zones humides continentales et méditerranéennes à travers les réseaux MAB, MedWet et Ramsar.

- Valorisation proposée
- Publications scientifiques et présentations à des conférences nationales et internationales.
 - Pages dédiées au projet sur le site internet de la Tour du Valat (avec une mise à jour trimestrielle ou plus fréquente selon actualités), avec des liens depuis les sites web des partenaires et équipes associées (CEREGE, ORE RESYST, projet IMPLIT, PNR, RNC), avec zone de téléchargement de documents (rapports, cartes...).
 - Organisation avec le CPIE Rhône – Pays d'Arles, d'une réunion de restitution publique et de débat avec les intervenants du projet.

- Références bibliographiques des proposant :

Fondation Sansouire, Station Biologique de la Tour du Valat

- 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.
- Chauvelon, P., Tournoud, M.G., Sandoz, A., Berceaux, A., Heurteaux, V. 2001. Modélisation du fonctionnement hydrologique d'un hydrosystème côtier méditerranéen fortement anthropisé: l'île de Camargue. UNESCO, PHI-V/ Documents techniques en hydrologie/ n°51, p 217-224.
- Chauvelon P., Sandoz A., Heurteaux, V., and A. Berceaux, 2001. Satellite remote sensing and GIS used to quantify water input for rice cultivation (Rhône delta, France). *International Association of Hydrological Sciences Publication*. no 267, p 446-450.
- 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., Sandoz, A., Pichaud, M., 2005. Major driving forces affecting water, salt, and sediment fluxes in the Rhone river delta: knowledge acquired from recent events and reflection for the future. **Proc. Conf. Coastal Wetland in the Global Change context, CoastWetChange, UNESCO, Venise, 2004 (sous presse).**
- Sandoz A., Chauvelon P., Pichaud M., et Buckwell P., 2004, Potentialités d'inventaires et de suivis d'inondation par télédétection satellitale radar, résultats obtenus dans le delta du Rhône (France), *Revue Française de Photogrammétrie et de Télédétection* 172, p 69-75.
- Sandoz A., Pichaud M., Chauvelon P., 2004. Estimation of water surfaces and volumes by remote sensing in the Rhône delta. *European geosciences union 1st general assembly (Nice, April 2004)*.
- Lopez, P., Puech, C., Sandoz A., Chauvelon P., 2004. Satellite images and relief delineation following wetland spatial. *European geosciences union 1st general assembly (Nice, April 2004)*.

Université de Provence, Laboratoire Chimie de l'Environnement

- Comoretto, L., Chiron, S., Arfib, B. (2004) Spatial concentration and seasonal variation of pesticides in the Rhône river delta (France). 9th FECS Conference and 2nd SFC meeting on chemistry and the environment. Bordeaux convention center, 29 august - 1 September 2004.
- Comoretto, L., and S. Chiron (2005) Comparing pharmaceutical and pesticide loads into a small Mediterranean river. *Sci. Total Environ.* sous presse.
- Arfib B., Chiron S., Comoretto L., Talva R. (2004) Diagnostic d'un bassin versant agricole : écoulement, transfert et pollution - Cas de la riziculture Camarguaise. Rapport Université de Provence, avec la participation de P. Chauvelon et M. Pichaud (Fondation Sansouire), 70 pages.

CEREGE Géochimie

- C. Claude-Ivanaj, B. Bourdon, and C. J Allègre, Ra-Th-Sr isotope systematics in Grande Comore island : A case study of plume lithosphere interaction. *Earth and Planetary Science Letters*, 164/1-2, 1998, 99-117.
- B. Bourdon, J.-L. Joron, C. Claude-Ivanaj, C.J. Allègre U-Th-Pa-Ra systematics for the Grande Comore volcanics : melting processes in an upwelling plume., *Earth and Planetary Science Letters*, 164/1-2, 1998, 119-133.
- Radakovitch O., Charmasson S., Arnaud M, and P. BOUISSET. 1998. ²¹⁰Pb and caesium accumulation in the Rhône delta sediments. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 48, 77-92.
- Radakovitch O., R.D. Cherry and S. Heussner, 1999. ²¹⁰Po and ²¹⁰Pb: tracers of particle transfer on the Rhône continental margin (NW Mediterranean). *Deep Sea Research I*, 46/9, 1539-1563.

CEREGE Impacts géomorphologiques côtiers

Olivier Samat , François Sabatier and Adrien Lambert (accepté) Bathymetric survey around a seawall on a barred profile (Rhône delta, Mediterranean Sea, France) Coastal Dynamics, Barcelona

Samat O., Lambert A., Sabatier F. (sous presse). Erosion des fonds sableux au droit d'une digue (site de Véran, Golfe du Lion, France). *VIIIèmes Journées Nationales, Génie Côtier Génie Civil*, Compiègne, 7 au 9 septembre 2004

Sabatier F. Stive M. and Pons F. (in press) Longshore variation of depth of closure on a micro-tidal wave-dominated coast. *International Conference of Coastal Engineering 2004*, Lisboa.

Sabatier F. et Provansal M. (2000) Bilans morphologiques, répartition granulométriques et direction du transport sédimentaire autour du brise-lames de Ste Anne, delta du Rhône. *Génie Civil Génie Côtier*, 207-216.

Morellato D., Sabatier F., Pons F. et Gaufrès P (sous presse). Comparaison de deux modèles cross-shore d'érosion des plages (Site de Rousty, Delta du Rhône, France). *VIIIèmes Journées Nationales, Génie Côtier Génie Civil*, Compiègne, 7 au 9 septembre 2004

Meftah K., Sergent P, Gomi P, Pons F, Sabatier F. (sous presse). Chaîne d'outils intégrés permettant la modélisation de l'évolution d'un profil sur le site du Rousty. *VIIIèmes Journées Nationales, Génie Côtier Génie Civil*, Compiègne, 7 au 9 septembre 2004

UMR Espaces DESMID

Allard, P., Bardin, O., Barthélémy, C., Pailhès, S., Picon, B., 2001. "Eaux, Poissons et pouvoirs. Un siècle de gestion des échanges mer-lagune en Camargue", *Natures, Sciences, Sociétés*, Vol.9, n°1, pp. 5-18.

Aznar, J.C., Dervieux, A., Picon, B., 2000. Les enjeux de la gestion hydraulique dans le delta du Rhône. DESMID, EA 3293 Université de la Méditerranée, Marseille. Synthèse des travaux. Rapport final PNRZH et annexes.

Dervieux, A., Allard, P., Naizot, T., Auda, Y., 2002. "La Camargue est-elle un polder ? Changement et stabilité dans le delta du Rhône depuis le début du XIXe siècle", in : Equilibre et rupture dans les écosystèmes depuis 20 000 ans en Europe de l'Ouest (Dir. : Richard, H., Vignot, A.), Presses Universitaires de Franche-Comté, Annales littéraires, Série Environnement, Sociétés et Archéologie, Besançon. 3 : 315-329.

Franchesquin, N., Dervieux, A., 2004. Modélisation de la gestion hydraulique en Camargue : une approche multi agents. In *actes du colloque de restitution des résultats du Programme National de Recherches sur les Zones Humides*, Toulouse, 22-24 octobre 2001, PNRZH.

Picon, B., Provansal, M., 2002. "Faut-il se protéger de la mer ? Instabilités naturelles et politiques publiques dans le delta du Rhône", *Faire savoirs*, n°2, octobre 2002, Marseille : AMARES, pp. 75-80.

CEFE –CNRS Montpellier

Mathevet R., (2004). – *Camargue incertaine. Sciences, usages et natures*. Buchet-Chastel Editions, Paris. 201p.

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., Gigot G., Lefebvre G., Poulin B., Mauchamp A. (2005) – *ButorStar: a role-playing game for collective awareness of reedbed wise use*. Simulation & Gaming (Sous presse)

Mathevet R., Mauchamp A., Grillas P., (2002). – *Multi-usage et conservation des zones humides ou quel développement durable pour la Camargue ? Faire-Savoirs n°2 : 33-39*.

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.

Organisation de la proposition

- Composition, temps affecté à la recherche et responsabilité de chaque membre de l'équipe et de chaque partenaire (leur signature est souhaitée) :

Fondation Sansouire. - Hydrologie (Action 1) Analyse spatiale (Action 2)

P. Chauvelon (CR) 17 mois ; **M. Pichaud** (IE) 19,5 mois ; **A. Sandoz** (IR), 11 mois: analyse données hydro climatiques, modélisation hydrologique et hydraulique ; SIG bassin versant et système lagunaire.

Réserve Nationale de Camargue - Analyse spatiale (Action 2)

E. Coulet, directeur : participation de l'équipe de la RNC au SIG étangs inférieurs, réalisation de campagne topo-bathymétriques.

CETMEF – Analyse alea couplé modélisation hydraulique (Action 1)

P. Gaufres (ingénieur) : analyse données marégraphiques, statistiques, modélisation hydraulique et intrusion saline.

CEREGE – Géochimie (Action 3)

O. Radakovitch (MdC), 5 mois ; **C. Claude** (MdC), 5 mois ; **D Hermitte** (ingenieur), 4mois. Estimation flux souterrain par traceur Radon.

Laboratoire Chimie de l'Environnement – Université Provence (Action 3).

B. Arfib (MdC) ; **L. Comoretto** (Thésarde) : analyse pesticides et estimation flux, modélisation.

CEREGE - Impacts géomorphologiques côtiers (Action 4)

M. Provansal (Professeur) 5 mois ; **O Samat** (Thésard) : recul du rivage, quantification des relevés topo-bathymétriques, analyses de données.

CETE Méditerranée - Impacts géomorphologiques côtiers (Action 4)

F. Pons (chargé d'étude) : modélisation de la houle en collaboration avec le CEREGE (SWAN)

DESMID - Analyse sociologique de la gestion hydraulique (Action 5)

B. Picon (DR), à 5% ; **A. Dervieux** (Ingénieur) à 15%, Stagiaire 6 mois: définition de la démarche d'enquête, enquêtes auprès des acteurs, traitements statistiques, interprétations.

CEFE CNRS Gestion concertée Jeux de Rôle (Action 5)

R. Mathevet (CR), responsable, (collaboration M. Etienne (INRA Avignon), C. Le Page (CIRAD Montpellier)) : Adaptation modèle simulation et jeu de rôle, réalisation des jeux, analyse.

- Participation effective ou prévue à d'autres programmes de recherche régionaux, nationaux et européens :

IMPLIT (Impact des événements extrêmes (tempêtes et surcotes) liés au Changement Climatique sur les hydro-systèmes du littoral méditerranéen français), (APR du MEDD : GICC 2).

Politiques Territoriales et développement durable : « A l'Ouest des Bouches-du-Rhône, trois territoires types pour penser la durabilité : le projet de pays d'Arles, la réhabilitation de l'Etang de Berre, le contrat de delta Camargue ». 2004-2005.

- Calendrier de la recherche :

mois	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36		
Action 1. Modélisation hydrologique et hydraulique de l'Ile de Camargue																																						
Action 1-1	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X																					
Action 1-2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X																		
Action 1-3						X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X						
Action 1-4						X						X						X									X	X	X	X	X	X	X	X	X			
Action 2. Analyse spatiale - Système d'Information Géographique																																						
Action 2-1	X	X	X	X	X								X	X									X	X												X		
Action 2-2	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X									X	X												X		
Action 2-3															X	X																	X	X	X	X		
Action 3. Flux et transfert dans l'hydro système																																						
Action 3-1	X	X						X	X	X	X	X	X									X	X	X	X	X	X											
Action 3-2											X	X	X										X	X	X	X												

