

Petite chronique de l'eau : modèle et écologie

- **Alain Dervieux** *
Ecologue, DESMID/CNRS
- **Nathalie Franchesquin** **
Informaticienne, CEDRIC

« *Le fait qu'un système complexe comprenne de nombreux objets scientifiques n'est pas contradictoire avec le fait que le système dans son ensemble soit aussi un objet scientifique* »

Jean-Marie Legay (1997, p 102).

Dans un delta, l'eau est le déterminant des activités humaines et des paysages. La Camargue n'échappe pas à cette réalité. Le fleuve a apporté les sédiments nécessaires à son élaboration. La mer y a déposé durablement le sel qui fixe, avec le climat et l'absence de relief important, les composantes majeures du fonctionnement de ses écosystèmes. Ces particularités définissent des caractéristiques

En Camargue, la gestion de l'eau et les contraintes naturelles (climat, absence de relief, présence du sel) produisent un système complexe. Pour mieux comprendre le fonctionnement global de cette zone humide méditerranéenne littorale prestigieuse et les enjeux écologiques et environnementaux qui la parcourent, l'approche interdisciplinaire est indispensable. Dans une réflexion sur l'apport mutuel de disciplines comme l'écologie et l'informatique, les auteurs font le point sur un travail de simulation du fonctionnement hydrologique de l'Île de Camargue. Cette modélisation multi-agents est construite en mettant en interaction un modèle hydrologique des eaux de surface et un modèle du comportement des acteurs de l'eau qui définissent sa gestion. La simulation du fonctionnement de cet hydrosystème anthropisé oblige à une prise de recul propice à la réflexion sur l'objet de la recherche et ses implications.

téristiques propres à cette zone humide littorale méditerranéenne et déterminent les principales contraintes abiotiques : précipitations hivernales, sécheresses estivales, qui diluent et cristallisent le sel, jouant plus ou moins sur sa présence dans l'eau et le sol selon l'altitude.

* *DESMID, Université de la Méditerranée, 1 rue Parmentier, 13200 Arles Alderv.desmid@wanadoo.fr*

** *Conservatoire National des Arts et Métiers, 292 r St Martin, 75003 PARIS franchises@cnam.fr*

Ce travail, mené en collaboration avec le LSIS (UMR CNRS 6168), a été réalisé dans le cadre du projet "Les enjeux de la gestion hydraulique dans le delta du Rhône" du Programme National de Recherches sur les Zones Humides (PNRZH), a été financé par la Région PACA.

Cependant, l'eau y est aussi et surtout drainée et introduite massivement par pompage, au gré des besoins des activités humaines : riziculture, conservation de la nature, chasse, pêche, élevage (Dervieux, Allard, Naizot & Auda, 2002). La Camargue forme ce que l'on nomme un système complexe (Barbault, 1995) qui doit sa complexité à son origine deltaïque récente et à la contestation par l'homme du caractère sauvage résultant de cette origine.

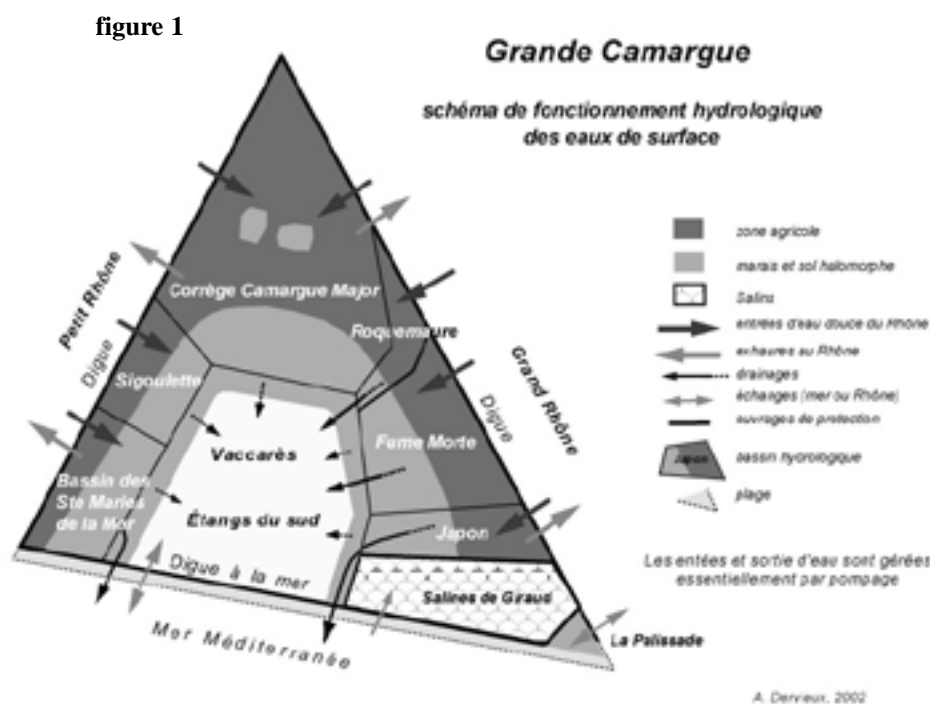
Le propos de notre article est d'évoquer un travail de modélisation du fonctionnement hydrologique de l'Île de Camargue ayant réuni des spécialistes en informatique, en écologie, en sociologie et en histoire. Au-delà de l'intérêt que présentent les approches interdisciplinaires avec les sciences humaines dans le champ des recherches sur l'environnement, nous aborderons plus particulièrement les apports mutuels d'un dialogue entre l'écologie et l'intelligence artificielle pour définir un modèle du fonctionnement de cette zone humide.

Ce modèle, que nous ne présenterons pas ici en détail (voir Franchesquin, 2001 ; Franchesquin & Dervieux, à paraître) est un modèle multi-agents qui décrit les relations entre le système hydraulique et les acteurs de l'eau, représentés par les décisions qu'ils prennent pour en définir la gestion. Ces relations produisent un état du Vaccarès et des étangs du sud en terme de niveau et de salinité, qui a une forte incidence sur la qualité écologique du système. La valeur écologique accordée à l'étang du Vaccarès est considérée comme représentative de la situation écologique globale (nous ne discuterons pas ce point ici). L'intérêt de ce travail se situe autant dans la simulation mettant en œuvre le modèle multi-agents, que dans la réflexion menée pour sélec-

tionner des variables intégratives du système et décrire le comportement des agents. Ces choix constituent un nécessaire travail de simplification qui s'appuie sur une expérience interdisciplinaire déjà ancienne sur le delta. Il doit aussi beaucoup aux chercheurs et gestionnaires ayant travaillé et travaillant en Camargue. Tenter de simuler le fonctionnement d'un tel anthroposystème oblige à une prise de recul propice à la réflexion sur l'objet de la recherche et ses implications. Un prolongement de ce travail est en cours avec la réalisation d'un prototype, qui pourrait constituer un intéressant outil d'aide à la décision.

Ecosystèmes, gestion hydraulique et paysages camarguais

La Camargue abrite plusieurs types d'écosystèmes en interactions qui constituent ces paysages de rizières, de marais, de sansouires¹ et d'étangs. Nous ne nous étendons pas ici sur les définitions d'écosystèmes et de paysages ou d'écologie (voir pour cela Barbault, 1995 ; Blondel, 1995 ; Burel & Baudry, 1999 ; Frontier & Pichot-Viale, 1995). Retenons simplement que cette diversité et le caractère humide des milieux permettent à de nombreuses espèces de coexister. On y observe une grande richesse des



peuplements d'oiseaux et une grande variété des espèces végétales, base des chaînes trophiques (Blondel & Isenmann., 1981 ; Barbault, 1994). C'est, dans la mesure où elle est un élément clé du fonctionnement du système, la gestion hydraulique qui détermine la diversité biologique camarguaise (Aznar, Dervieux & Picon, 2000).

La Grande Camargue ou Île de Camargue se compose de 4 grands types de paysages spatialement déterminés par les variations d'altitude (fig. 1) : les paysages agricoles autour des bourrelets alluviaux actuels et anciens ; les paysages " naturels relictuels " des étangs centraux (paysages des réserves naturelles) ; le paysage des marais périphériques, géographiquement situé entre les deux précédents ; les salins de Giraud. Notre travail ne porte pas sur ces derniers car leurs eaux de surface sont isolées au sud-est de l'île par des digues et qu'ils ne fonctionnent qu'avec les eaux marines. Les faibles variations d'altitude définissent une succession de dépressions et d'éminences déterminant les occupations du sol, des étangs et marais aux sols halomorphes (Dervieux & al., 2002), jusqu'aux rizières et aux autres cultures sur les bourrelets alluviaux.

L'évolution historique du système a débouché sur un ensemble de bassins hydrauliques collectifs (fig. 1) visant à gérer les eaux d'écoulement pour les renvoyer vers le fleuve, les étangs du centre et la mer. L'important réseau d'irrigation qui s'y ajoute est indispensable à la riziculture dont le développement est lié à celui des techniques de pompage. L'eau est bien sûr totalement maîtrisée sur les parcelles rizicoles. Dans les grands marais périphériques, l'artificialisation du fonctionnement hydrologique varie en fonction de leur vocation, avec une grande diversité de situation selon qu'ils sont affectés à la chasse ou à la conservation. Dans les étangs centraux, la gestion de l'eau est réactive. Il n'y a pas d'alimentation directe en eau et les étangs " héritent " seulement des écoulements d'eaux agricoles ou pluviales. Écoulements et échanges avec la mer conditionnent les niveaux et les salinités de ces étangs, et leurs répercussions sur l'hydrologie du delta sont des clés de la compréhension d'un fonctionnement global. C'est à

partir de cet ensemble encore appelé système Vaccarès, qu'est définie une gestion globale de l'eau.

350 à 400 millions de m³ d'eau douce sont aujourd'hui introduits annuellement en Camargue, entre les mois d'avril et de septembre, selon les surfaces cultivées en riz. La disponibilité en eau pendant la période sèche, offre l'opportunité aux exploitants et gestionnaires d'utiliser une eau douce facilement accessible pour modifier le rythme naturel d'inondation hivernale et d'assèchement estival des milieux humides non agricoles. La saisonnalité hiver humide / été sec, caractéristique des zones humides méditerranéennes, est donc aisément remise en question.

Environ 1/4 de l'eau introduite est écoulee vers le Vaccarès et les étangs centraux. Dans ces lagunes, le maintien d'une salinité acceptable par l'ensemble des acteurs de l'eau, est un objectif commun pour pallier les variations fortes de salinité qu'on a pu observer depuis cinquante ans. Le Vaccarès et les étangs du sud sont devenus permanents et faiblement saumâtres à la suite du premier développement rizicole des années 60, puis très salés en raison de la conjonction crise du riz-années sèches dans les années 70 (Heurteaux, 1992). On tente aujourd'hui de stabiliser le système et de maintenir une salinité d'environ 15g/l, pour une variation du niveau de l'étang de Vaccarès, qui sert là encore de référence, oscillant d'environ 20 cm autour du 0 NGF.

La nouvelle crise engendrée par les inondations d'octobre 1993 et janvier 1994 a provoqué une prise de conscience générale et la constitution d'une Commission de l'Eau, structure de concertation au sein du Parc Naturel Régional de Camargue (PNRC). Elle a permis la rencontre d'acteurs souvent en conflit : agriculteurs, éleveurs, pêcheurs, chasseurs et conservateurs de la nature, pour définir collectivement un état hydro-salin du Vaccarès.

La tendance à l'adoucissement et à la stabilisation de la présence de l'eau durant l'été (Dervieux et al., 2002) modifie les écosystèmes saumâtres caractéristiques de ce delta méditerranéen pour les faire évoluer vers des milieux banalisés, c'est-à-dire voisins de milieux de type continental (Aznar, 2000 ; Tamisier &

Grillas, 1994). La tendance à gommer les fluctuations dues aux caractéristiques climatiques du delta, semble aujourd'hui s'atténuer pour laisser la place à une gestion plus proche des rythmes naturels. Elle reste néanmoins incontournable, pour des raisons historiques liées à la mise en place des aménagements hydrauliques, mais aussi pour atteindre des objectifs de gestion conformes aux représentations actuelles des " milieux naturels " (par exemple, favoriser le séjour de l'avifaune), et répondant aux besoins de l'ensemble des activités humaines.

Ce qu'il faut retenir de cette présentation générale, c'est l'imbrication aujourd'hui totale des différents milieux et paysages au travers de la gestion de l'eau, qui justifie l'intérêt porté au fonctionnement hydrologique global du système.

L'approche multi-agents²

Nous ne présenterons ici que le principe de cette modélisation. Pour une description complète, on se reportera à Franchesquin (2001).

Les systèmes multi-agents offrent la possibilité de représenter directement les individus (agents, matériels ou humains) intervenant dans la problématique, leurs comportements, leurs interactions et leur environnement (Jennings, Sycara & Wooldridge, 1998 ; Ferber, 1995 ; Weber, 1995). Le comportement global d'un système est représenté comme la conséquence d'un ensemble d'interactions entre agents dotés de capacités de communication et de délibération. Ils permettent de modéliser les mécanismes de décision intervenant lors du choix d'une action (Mathevet, 2000).

Notre objectif était de formaliser le fonctionnement global de l'écosystème Camargue en prenant en compte sa dynamique propre, liée au climat (précipitations, évaporation), au sel, à la géomorphologie, et les processus décisionnels de gestion hydraulique intervenant sur cette dynamique. Ces décisions qui orientent le fonctionnement hydrologique de la zone humide sont schématisées dans la figure 2. Les décisions collectives sont formalisées selon un processus de négociation (" commission de l'eau ") qui définit des objectifs de gestion, suivi d'un

processus de coopération entre acteurs de la gestion hydraulique collective (" gestion drainage " et " gestion digue ") pour respecter les objectifs définis. Le premier reflète les négociations de la Commission de l'Eau au sein du PNRC pour définir un état hydro-salin consensuel du Vaccarès. Le second concerne les actions qui en résultent au sein des associations hydrauliques de drainage et pour le gestionnaire de la digue à la mer.

figure 2 : Relations entre décisions et état hydro-salin du Vaccarès.



Les processus décisionnels de gestion hydraulique, négociés au sein de la Commission de l'eau (médiation assurée par le Parc Naturel Régional de Camargue) contraignent la gestion collective de l'eau « gestion drainage » et « gestion digue » en fixant des objectifs en termes de niveau et salinité du Système.

Architecture générale du modèle

Le cadre de la modélisation est basé sur deux modèles principaux : un modèle hydrologique et un modèle social.

Le modèle hydrologique

Il s'appuie sur un ensemble d'unités hydrauliques fonctionnelles créées à partir d'un système d'informations géographiques, pour faire face à deux objectifs : définir des zones dont le comportement hydraulique est considéré comme homogène, fournir les points d'intervention sur lesquels les agents du modèle social vont agir. L'évolution de l'état hydro-salin du système Vaccarès repose sur un cycle de l'eau simplifié

qui prends en compte les conditions climatiques (pluie et évapotranspiration) puis qui intègre les décisions de gestion prises par les agents du modèle social.

N3Le modèle social

Les décisions de gestion hydraulique sont formalisées par 2 étapes : l'élaboration d'un contrat, puis sa réalisation. Ce contrat établi collectivement par les représentants des activités, pêche, agriculture et protection de la nature, doit être respecté par les acteurs de la gestion hydraulique collective. La phase de réalisation du contrat décrit la négociation " associations hydrauliques - gestionnaire de la digue à la mer " pour la mise au point d'un plan d'action permettant de respecter ce contrat : quantités d'eau à drainer dans le Vaccarès, modalités d'ouverture des martelières (vannages) de la digue à la mer qui détermine les échanges avec la mer (Allard, Bardin, Barthélémy, Pailhès & Picon, 2001).

Modèles de décision

Phase d'élaboration du contrat

Cette phase s'appuie sur la définition de matrices de satisfaction représentant la position d'une activité donnée (pêche, agriculture, protection en l'occurrence) face à différents états hydro-salins du système Vaccarès. Elles ont été

tableau 1 : Matrice de satisfaction par activité pour la période rizicole.

Niveau(cm)	Salinité (g/l)						
	5	10	15	20	35	>35	
< -30	5	4	4	3	2	1	Agriculture
-10	5	4	4	3	2	1	
0	5	4	4	3	2	1	
20	5	4	3	2	1	1	
40	3	3	2	1	1	1	
>40	1	1	1	1	1	1	
< -30	2	2	2	3	2	1	Pêche
-10	2	2	2	4	2	1	
0	3	3	3	5	2	1	
20	3	3	4	4	2	1	
40	2	2	3	3	2	1	
>40	2	2	2	1	1	1	
< -30	1	1	3	5	5	3	Protection
-10	1	1	4	5	5	2	
0	1	1	3	4	3	1	
20	1	2	3	4	2	1	
40	1	1	1	1	1	1	
>40	1	1	1	1	1	1	

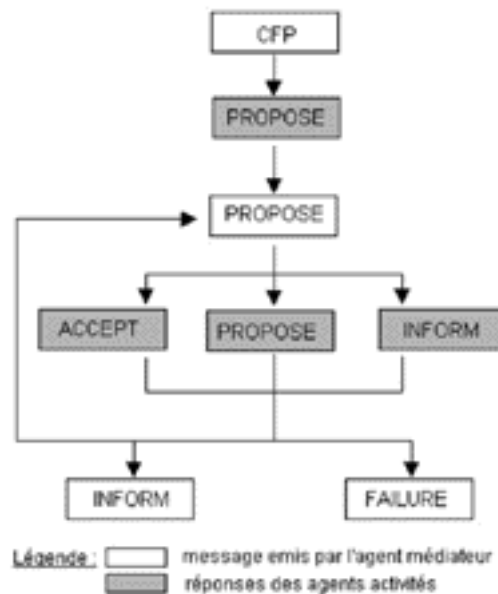
Pour chaque activité et pour chaque période de l'année, elle décrit pour chaque couple niveau - salinité l'indice de satisfaction d'une activité (échelle de 1 à 5).

réalisées en collaboration avec des gestionnaires de la Réserve Nationale de Camargue et du Parc. Nous avons ainsi défini un modèle de décision spécifique basé sur des coefficients de satisfaction selon une échelle de 1 à 5. Le tableau 1 présente de manière synthétique le résultat de ce travail pendant la période rizicole.

La difficulté d'élaborer cette matrice est de représenter simultanément et selon les deux modalités saisonnières correspondant aux deux principaux modes de gestion de l'eau (priorité au drainage, priorité à l'irrigation), un niveau et une salinité souhaitables du Vaccarès qui tiennent compte des conséquences sur la salinité des étangs du sud qui, faute d'échanges, peut augmenter considérablement en été.

Chaque " agent activité " est doté d'une matrice spécifique qu'il va utiliser pour répondre aux

figure 3 : Protocole de négociation pour la CDE.



Ce protocole, permet un échange itératif de propositions entre un médiateur (ici le PNRC) et les parties (les activités). Dans un premier temps, le médiateur lance un appel à propositions (CFP) à toutes les parties présentes. Celles-ci émettent leur proposition, permettant au médiateur de calculer un compromis qu'il leur soumet. Elles peuvent alors accepter ce compromis (ACCEPT), faire une nouvelle proposition (PROPOSE) ou encore rester sur leur proposition précédente (INFORM). Face à ces nouvelles informations, le médiateur peut notifier un échec ou un succès de la négociation, ou proposer un nouveau compromis.

questions de “ l’agent médiateur ” (le Parc) lors de la négociation du contrat. Dans cette négociation, dont le schéma est donné en figure 3, l’“agent médiateur ” interroge les “ agents activités ” et en fonction de leur réponse (une réponse est un couple “ niveau, salinité ” souhaité par un “ agent activité ”) propose un consensus qui est approuvé ou rejeté. Le processus réitère, permettant aux “ agents activités ” de revoir leur position.

Phase de réalisation du contrat

Une fois le contrat établi, l’agent “Gestionnaire de la Digue à la mer” est responsable de sa réalisation. Pour cela il interagit avec les “ agents associations de drainage ” pour définir les quantités drainées au Système Vaccarès et l’ouverture de la digue à la mer permettant de respecter le contrat ou du moins de s’en rapprocher.

Simulations

Élaboration d’un contrat

Un exemple de contrat défini au terme de la négociation est présenté dans le tableau 2. Il présente au tableau 3 des indices de satisfaction différents selon les activités tout en se situant

tableau 2

	Rizicole	Non rizicole
Niveau (cmVANOFF)	-12.8	-2.1
Salinité (g/l)	15.3	15.9

tableau 3

Activité	Rizicole	Non rizicole
Agriculture	4	4
Pêche	2	5
Protection	3	4

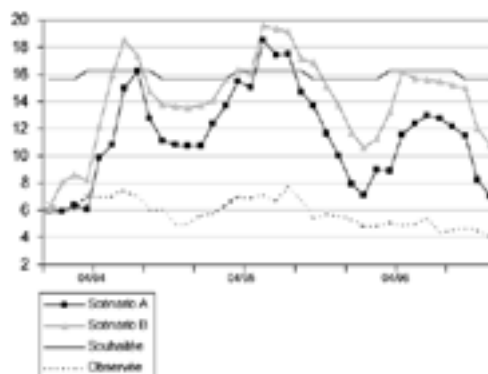
parmi les solutions optimales pour l’ensemble du groupe des acteurs.

Ce contrat exprime un consensus autour d’une stabilité de l’état hydro-salin du Vaccarès. La gestion hydraulique actuelle, qui draine les terres en hiver et irrigue pour le besoin des cultures en été, tend effectivement vers une permanence et une stabilisation des niveaux de cet étang.

Réalisation du contrat

Nous présentons en exemple le résultat de 2 simulations (Franchesquin, 2001) réalisées selon deux scénarios pour tester l’effet de différentes caractéristiques des associations hydro-

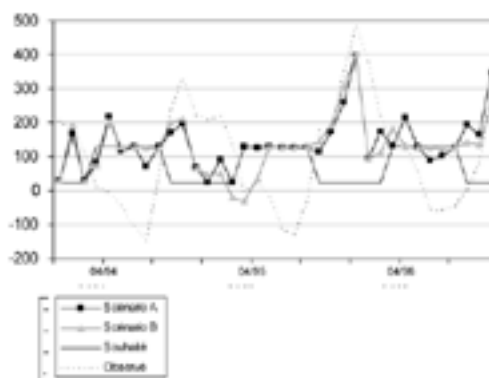
figure 4



liques de drainage sur leur capacité à respecter le contrat :

- *Scénario A* (fig. 4) : Les caractéristiques des associations hydrauliques de drainage correspondent à la situation actuelle. Les associations de drainage acceptent de modifier leur gestion seulement s’il s’agit de drainer plus d’eau dans le Vaccarès. Le drainage par repompage vers le Rhône ne pourra être augmenté, d’une part parce que les associations poldérisées repompent toutes leurs eaux vers le fleuve par défaut, et d’autre part, parce qu’elles refusent de drainer les eaux d’autres

figure 5



associations non poldérisées. Ce scénario permet d’évaluer la capacité de la gestion hydraulique collective actuelle à respecter le contrat.

- *Scénario B* (fig.5) : Il est identique au scénario A, mais dans ce scénario les deux associations

hydrauliques de drainage Roquemaure et Fumemorte sont poldérisées et disposent d'une capacité de repompage vers le Rhône de 20 millions de m³/mois.

Ces simulations permettent de tester des scénarios fondés sur la modification des caractéristiques des associations hydrauliques de drainage. Elles se déroulent sur trois années consécutives de 1994 à 1996, l'état initial du Vaccarès étant celui de décembre 1993 (selon Gindre, Heurteaux & Vianet, 1999). L'occupation du sol est figée pour ces trois années à ce qu'elle était en 1996 (source PNRC). Les facteurs pluie, évapotranspiration et niveau de la mer correspondent aux années de référence. Le contrat à respecter est celui défini ci-dessus.

Commentaires

Les séries temporelles dont nous disposons pour ces tests sont très courtes et incitent à la prudence quant aux conclusions que l'on peut en tirer. Elles concernent en outre une période où les précipitations ont été supérieures à la normale. Le scénario B permet de mieux se rapprocher du contrat, en particulier pour la salinité, sans toutefois gommer les variations climatiques. Si les niveaux sont assez bien stabilisés, hormis les épisodes pluvieux de janvier et décembre 1996, la salinité varie avec les saisons. Les exemples de simulations que nous venons d'évoquer montrent par ailleurs que l'influence des variations climatiques ne sont pas négligeables (Franchesquin, 2001).

Il est remarquable de constater que ce scénario correspond à des projets envisagés depuis plusieurs décennies déjà. La poldérisation complète des bassins de drainage est en effet régulièrement évoquée pour améliorer la gestion globale de l'eau en Camargue. Les canaux de Roquemaure et Fumemorte déversent en effet aujourd'hui la totalité de leurs eaux au Vaccarès (60 millions de m³/an). Un scénario basé sur une poldérisation de l'ensemble des bassins de drainage donne une meilleure réponse en terme de bilan hydrique, sans préjuger de conséquences écologiques. Les flux piscicoles par exemple en seraient certainement affectés.

Discussion et conclusion

La difficulté de ce projet de modélisation est imputable à la grande complexité du système et aux contraintes imposées par la sélection nécessaire de variables pour en rendre compte. Dégager les variables pertinentes et porteuses de la dynamique de l'écosystème est une tâche d'autant plus délicate que toutes ne sont pas bien connues (influence des nappes souterraines salées par exemple).

Outre la définition d'unités hydrauliques fonctionnelles permettant de caractériser la dynamique du modèle hydrologique, le choix et la constitution de variables déterminant les processus décisionnels de la gestion hydraulique ont été l'objet de nombreuses discussions. Notre modélisation des positions des acteurs vis-à-vis d'un état hydro-salin du Vaccarès réalisé en collaboration avec les collègues du Parc et de la Réserve de Camargue (tab. 1), bien qu'extrêmement simplifiée, constitue un essai de synthèse des connaissances disponibles. L'impossibilité traditionnelle de satisfaire en même temps tous les acteurs, dont les besoins souvent ne convergent pas, est une difficulté majeure. Par exemple, un niveau bas souhaitable pour l'agriculture (écoulement des terres) peut être préjudiciable aux pêcheurs. Une salinité oscillant autour de 15g/l, suppose une augmentation potentielle de la salinité en été dans les étangs du sud, partiellement déconnectés du Vaccarès, qui peut être supérieure à 70g/l. Ceci est directement préjudiciable à la pêche : pas de captures, pas de flux biologiques majeur dans des eaux sursalées. Il serait intéressant de préciser ces matrices de satisfaction par un travail d'enquête plus approfondi auprès de l'ensemble des acteurs de l'eau.

L'intégration des variables sociales, qui ne sont pas nécessairement stables dans le temps, est un autre aspect des problèmes posés. Les recherches réalisées depuis des années en Camargue, et hors Camargue, font en effet "bouger" les représentations des acteurs sociaux³. Elles induisent une évolution de l'approche des sciences de la nature qui s'efforcent aujourd'hui d'intégrer les activités humaines dans leurs représentations du système. D'autre

part, les variables externes telles que le cours des céréales agissent sur les surfaces rizicoles et donc sur les entrées d'eau et les volumes disponibles pour d'autres besoins. Car on peut poser la question des conséquences d'une chute durable à 5000 ha de riz sur les objectifs de conservation et sur la gestion hydraulique du delta, sachant qu'alors les entrées d'eau douce tomberaient à moins de 150 millions de m³, c'est-à-dire trois fois moins qu'aujourd'hui.

Enfin, on remarquera que les premières simulations réalisées soulignent le paradoxe suivant : l'augmentation du poids de l'artificialisation du système, permet de se rapprocher d'une situation qui semble écologiquement satisfaisante. La gestion, élément à part entière du fonctionnement du système deltaïque, ne peut être envisagée comme stable dans le temps. Elle évolue forcément avec lui, contraintes naturelles et activités humaines confondues.

L'eau douce qui s'écoule des rizières est donc venue élever le niveau du Vaccarès et des étangs centraux, en les rendant permanents (Heurteaux, 1992) alors qu'ils s'asséchaient plus ou moins régulièrement après la transformation des digues en remparts contre les crues millénales à la fin du XIXe siècle. Ces facteurs de changement ont entraîné la nécessité d'évacuer les volumes superflus, qui nuisaient à la pratique des activités humaines. Avec l'évolution de la demande sociale, cette eau a très vite été utilisée pour alimenter les milieux non agricoles et favoriser le séjour en Camargue de l'avifaune migratrice, pour des raisons cynégétiques ou patrimoniales, induisant des objectifs spécifiques de gestion de l'eau. Cette évolution est liée au développement des loisirs qui a favorisé celui de la chasse. Elle est aussi la conséquence de l'apparition d'une "conscience écologique" et du souci de préserver la nature, qui a favorisé la multiplication des mesures de protection et le développement d'un tourisme spécifique. Cette recherche de stabilisation dans le temps des milieux aquatiques pour favoriser la présence des oiseaux⁴ n'est d'ailleurs finalement qu'un phénomène de "rétroaction" sociale. La richesse de la Camargue est célébrée depuis longtemps à travers les oiseaux qu'elle abrite. Il n'est donc pas surprenant qu'ils agissent indirectement sur

la gestion de l'eau quand on souhaite favoriser leur présence pour diverses raisons : hivernage, reproduction, chasse, attrait pour les visiteurs. Ils sont devenus de véritables emblèmes modernes de la Camargue, comme le sont toujours les emblématiques taureaux et chevaux de Camargue, héritage culturel.

Les interrelations entre facteurs naturels, usages et techniques de l'eau, produisent des paysages qui abritent des écosystèmes (Blondel, 1995). Ces écosystèmes sont à leur tour le refuge d'espèces animales et végétales, elles-mêmes en relation complexe (Barbault, 1995). La modélisation multi-agents nous permet de simuler le fonctionnement hydrologique du delta, dont dépendent la structure et l'évolution de ses écosystèmes et peuplements, très largement dépendants de la ressource en eau. Il peut permettre aux scientifiques de formaliser des aspects essentiels du système. Plus généralement, il propose une réflexion sur une approche globale de la gestion de l'eau, et une prise de recul indispensable. Le travail dans le long terme, à la lumière des autres disciplines, trouve ici sa justification. Il est un atout pour la connaissance et l'intégration des phénomènes qui président au fonctionnement et aux évolutions de la Camargue, aux différentes échelles d'espace et de temps.



- 1 - *Steppes salées à sursalées où dominent les salicornes, plantes herbacées succulentes (gorgées d'eau) adaptée à ces milieux mythiques Camarguais qualifiés de désert dans la littérature populaire.*
- 2 - *Une attention particulière va aux habitants du delta, les Camarguais, qui reçoivent depuis des années des chercheurs de toutes disciplines, forme de reconnaissance du regard que nous portons sur eux et leurs Camargues. Un regard étrange, s'il n'est plus tout à fait étranger.*
- 3 - *On peut avancer l'hypothèse que cette recherche de stabilité correspond sans doute aussi au besoin de l'humain de stabiliser au mieux son environnement naturel*

Références

- 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. *Nature-Sciences-Société*, 9, n°1, 5-18.
- Aznar, J. C., Dervieux, A., & Picon, B. (2000). Les enjeux de la gestion hydraulique dans le delta du Rhône. Rapport de synthèse des travaux. DESMID - PNRZH.
- Aznar, J.C. (2000). Étude du déterminisme de facteurs paysagers sur la distribution des macrophytes aquatiques en Camargue. Rapport DEA Structures et Dynamiques Spatiales. Université d'Avignon.
- Barbault, R., (1994). Des baleines, des bactéries et des hommes. Paris : Odile Jacob.
- Barbault, R. (1995). Écologie des peuplements. Structure et dynamique de la biodiversité. Paris : Masson.
- Blondel, J. (1995). Biogéographie. Approche écologique et évolutive. Paris : Masson.
- Blondel, J., & Isenmann, P. (1981). Guide des oiseaux de Camargue. Lausanne : Delachaux et Niestlé.
- Burel, F., & Baudry, J. (1999). Écologie du paysage. Concepts, méthodes et applications. Paris : Tec & Doc.
- Dervieux, A., Allard, P., Naizot, T., & Auda, Y. (2002). Stabilité et changements dans le delta du Rhône du XIXe au XXe siècle. in Équilibre et rupture dans les écosystèmes durant les 20 derniers millénaires : durabilité et mutation. Annales de l'Université de Franche-Comté, Sous-presse.
- Ferber, J. (1995). Les systèmes multi-agents, vers une intelligence collective. Paris : InterEditions.
- Franchesquin N. (2001). Modélisation et simulation Multi-Agents d'écosystèmes anthropisés : une application à la gestion hydraulique en Grande Camargue. Thèse d'informatique, Université de Droit, d'Économie et des Sciences d'Aix-Marseille, Aix-Marseille III.
- Franchesquin, N., Dervieux, A. (à paraître). 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
- Frontier, S., & Pichod-Viale, D. (1995). Écosystèmes. Structure, fonctionnement, évolution. Paris : Masson.
- Gindre, D., Heurteaux, P., & Vianet, R. (1999). Les infrastructures d'irrigation et de drainage sur le territoire du Parc Naturel Régional de Camargue. Historique, structure et fonctionnement. *Courrier du Parc*, 48/49, 44-80.
- Heurteaux, P. (1992). Modifications du régime hydrique et salin des étangs du système Vaccarès (Camargue, France) liées aux perturbations anthropiques des cinquante dernières années. *Annales de Limnologie*, 28, 2, 154-174.
- Jennings, N. R., Sycara, K., & Wooldridge, M. (1998). A roadmap of agent research and development. *Autonomous Agents and Multi-Agent Systems*, 1, 275-306.
- Legay, J.-M. (1997). L'expérience et le modèle. Un discours sur la méthode. Sciences en questions. Paris : INRA Éditions.
- Mathevet, R. (2000). Les systèmes multi-agents : de nouveaux outils pour une approche territoriale des problèmes environnementaux. *Montagnes Méditerranéennes*, 12, 211-219.
- Tamisier, A., & Grillas, P. (1994). A review of habitat changes in the Camargue : an assessment of the effect of the loss of biological diversity on the wintering waterfowl community. *Biological Conservation*, 70, 39-47.
- Weber, J. (1995). Gestion des ressources renouvelables : fondements théoriques. Site consulté en février 2002 : <http://cormas.cirad.fr/demarch/sma.htm>.