



RAPPORT SCIENTIFIQUE - EXTRAITS

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

LITEAU 2

Responsable scientifique du projet :

Philippe Chauvelon, Tour du Valat

Noms des autres partenaires scientifiques bénéficiaires :

**A. Mayer, O. Radakovitch, F. Sabatier, O. Samat, UMR 6635 CEREGE
(Centre Européen de Recherche et d'Enseignement des Géosciences de
l'Environnement) (Univ. d'Aix-Marseille 1 et 3)**

**A. Dervieux, A. Allouche, G. Jolly, UMR 6012 ESPACE, Equipe DESMID
(CNRS, Univ. Aix-Marseille 2)**

**S. Chiron, L. Comoretto, P. Höhener, Université de Provence, Laboratoire
de Chimie de l'Environnement**

**R. Mathevet, CNRS, CEFE, Centre d'Ecologie Fonctionnelle et Evolutive,
Montpellier**

**P. Gaufres, CETMEF Centre d'Etudes Techniques Maritimes et Fluviales,
Aix en Provence**

Y. Chérain, E. Coulet, Réserve Nationale de Camargue

M. Pichaud, A. Sandoz, Tour du Valat

AVANT PROPOS

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

Action 1 : Hydrologie – Hydraulique – Bilans salins et sédimentaires

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

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

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

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

Action 2 : Analyse de la dynamique spatiale

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

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

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

Action 3 Volet 1 : Flux et transfert de pesticides

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

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

Action 3 Volet 2 : Flux souterrains vers les étangs

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

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

Action 4 : Protection côtière et dynamique littorale

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

P 76

Ce document constitue un extrait du rapport scientifique final pour les fiches thématiques relatives à l'Action 3 Volet 1 : Flux et transfert de pesticides

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

Responsable P. Höhener, S. Chiron

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

Etude bibliographique sur les modèles existants :

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

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

Validation et harmonisation des données.

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

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

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

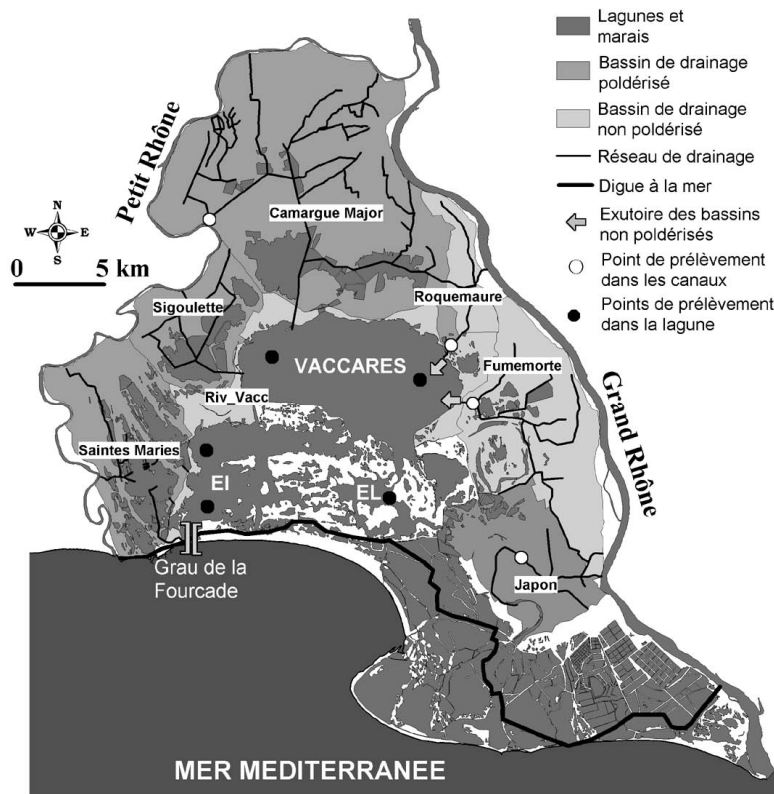


Figure 1 : localisation des points de prélèvements pour les pesticides dans l'île de Camargue.

Etude détaillée du transfert des pesticides dans un domaine rizicole.

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

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

Modèle pesticide intégré pour la Camargue:

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

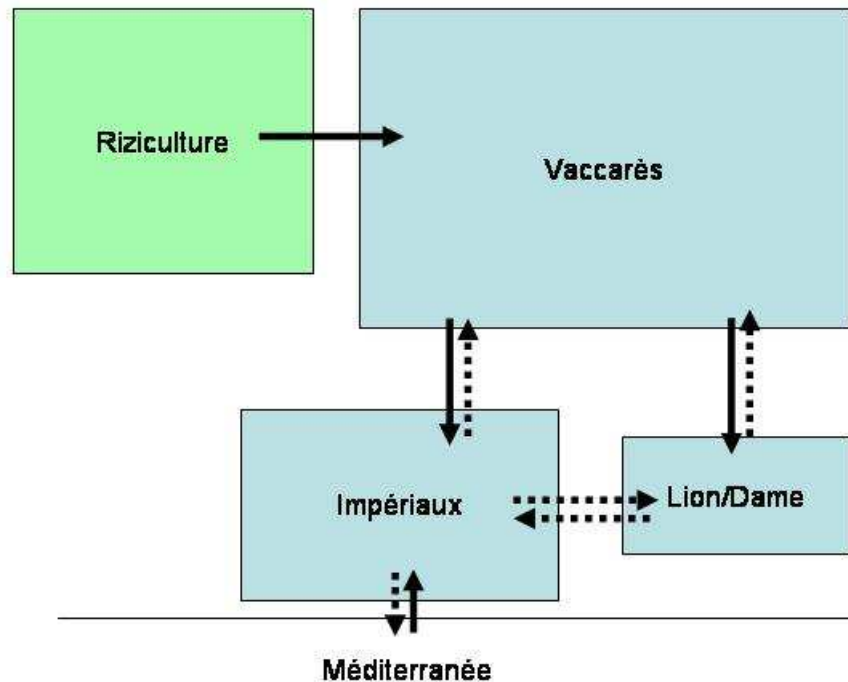


Figure 2 : Représentation schématique de l'hydrosystème simplifié de l'île de Camargue, avec les flux d'eau principaux pendant la saison de culture (flèches noires) et les flux d'eau possibles pendant les autres saisons (flèches pointillés).

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

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

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

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

Publications issues directement du projet GIZCAM

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

Autres références bibliographiques

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

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