



**HAL**  
open science

## Un modèle de décision d'assolement en riziculture conventionnelle et biologique pour prédire les usages des sols sous différents scénarios : cas de la Camargue (Sud de la France)

Florine F. Mailly, Sylvestre S. Delmotte, Noémie N. Schaller, Jean-Claude J.-C. Mouret, Santiago S. Lopez Ridaura, Jean Marc J. M. Barbier

### ► To cite this version:

Florine F. Mailly, Sylvestre S. Delmotte, Noémie N. Schaller, Jean-Claude J.-C. Mouret, Santiago S. Lopez Ridaura, et al.. Un modèle de décision d'assolement en riziculture conventionnelle et biologique pour prédire les usages des sols sous différents scénarios : cas de la Camargue (Sud de la France). Cahiers Agricultures, 2013, 22 (5), pp.424-431. 10.1684/agr.2013.0662 . hal-01001621

**HAL Id: hal-01001621**

**<https://hal.science/hal-01001621>**

Submitted on 28 May 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Distributed under a Creative Commons Attribution - NonCommercial 4.0 International License

## Un modèle de décision d'assolement en riziculture conventionnelle et biologique pour prédire les usages des sols sous différents scénarios : cas de la Camargue (Sud de la France)

Florine Mailly<sup>1</sup>  
Sylvestre Delmotte<sup>1</sup>  
Noémie Schaller<sup>2</sup>  
Jean-Claude Mouret<sup>1</sup>  
Santiago Lopez-Ridaura<sup>1</sup>  
Jean-Marc Barbier<sup>1</sup>

<sup>1</sup> INRA  
UMR Innovation (951)  
2 place P. Viala  
34060 Montpellier cedex 2  
France  
<florine.mailly@supagro.inra.fr>  
<sylvestre.delmotte@supagro.inra.fr>  
<mouret@supagro.inra.fr>  
<ridaura@supagro.inra.fr>  
<jean-marc.barbier@supagro.inra.fr>

<sup>2</sup> AgroParisTech  
UMR SADAPT (1048)  
F-78850 Thiverval-Grignon  
France  
<noemie.schaller@agriculture.gouv.fr>

### Résumé

En Camargue, dans le delta du Rhône au sud de la France, le riz irrigué est la principale céréale cultivée. Il joue un rôle clé dans la constitution des systèmes de culture et contribue à la mise en valeur des terres et à l'équilibre hydrologique du delta. La présente étude vise à formaliser sous forme d'un modèle à base de règles de décision les comportements des agriculteurs en matière d'assolement et à utiliser celui-ci pour évaluer les conséquences sur les surfaces rizicultivées de changements de contexte économique et de systèmes techniques. Une analyse des assolements pratiqués par les riziculteurs camarguais a permis d'identifier et de caractériser les contraintes et facteurs influençant les choix des cultures, leur surface et répartition dans le territoire de l'exploitation agricole. Quatre scénarios d'évolution des systèmes rizicoles ont été développés en croisant deux situations socio-économiques (attractivité économique faible ou forte du riz) et deux contextes d'évolution des pratiques des agriculteurs : maintien en agriculture conventionnelle (AC) ou conversion à l'agriculture biologique (AB). La surface totale régionale cultivée en riz irrigué a été calculée pour chaque scénario. Les résultats indiquent qu'en cas de contexte économique défavorable au riz, une forte diminution (en comparaison à la situation de référence de 2010) de la sole rizicole est probable avec des conséquences sur la fertilité des sols, que ce soit en AB ou AC. En contexte économique favorable, la surface rizicole maximale estimée en AB est surtout limitée par les impasses techniques rencontrées pour le contrôle des adventices, et par la difficulté de réaliser des rotations en zones basses sensibles aux remontées de sel.

**Mots clés :** contrainte ; delta ; région méditerranéenne ; riz irrigué ; système de culture.

**Thèmes :** méthodes et outils ; productions végétales ; sols ; systèmes agraires.

### Abstract

**A cropping plan decision model in conventional and organic rice cropping systems to predict land use changes under various scenarios: The case of the Camargue Delta, Southern France.**

In the Rhône River Delta of Camargue, Southern France, irrigated lowland rice is the main crop. It plays a key role in cropping systems and contributes to land use development and the hydrological balance of the delta. This study focuses on the implementation of a model based on decision rules, with the aim of representing farmers' cropping plans and to use in assessing the consequences of changes in the economic context and in technical systems in terms of irrigated rice area. An analysis of current rice growers' cropping plans in Camargue was carried out in order to identify the constraints and factors influencing the choice of crops, their surfaces and their

Pour citer cet article : Mailly F, Delmotte S, Schaller N, Mouret JC, Lopez-Ridaura S, Barbier JM, 2013. Un modèle de décision d'assolement en riziculture conventionnelle et biologique pour prédire les usages des sols sous différents scénarios : cas de la Camargue (Sud de la France). *Cah Agric* 22 : 424-31. doi : 10.1684/agr.2013.0662

Tirés à part : F. Mailly

doi: 10.1684/agr.2013.0662

spatial distribution. Four scenarios of evolution of rice cropping systems were developed by combining changes in the socio-economic context (weak or strong economic attractiveness of rice) and evolution of farmers' practices (organic or conventional agriculture). The area under rice cultivation was estimated for each scenario. Results indicate that in an unfavourable economic situation for rice, a significant reduction of the rice area (in comparison to the 2010 area) could occur, not without consequences on soil fertility, in either conventional or organic agriculture. In a favourable economic context, the estimated maximum rice area in organic agriculture appears to be mainly limited by technical problems experienced in weed control, and by the difficulties of implementing rotations in lowlands which are sensitive to salinization.

**Key words:** constraints; cropping systems; deltas; irrigated rice; Mediterranean region.

**Subjects:** farming systems; soils; tools and methods; vegetal productions.

## Introduction

Les deltas des grands fleuves sont des écosystèmes où l'agriculture doit s'adapter à de nombreuses contraintes, telles que la salinité des terres. La riziculture inondée est souvent un moyen de mettre en valeur ces espaces, notamment par les eaux douces qu'elle introduit dans le système. En Camargue (delta du Rhône, France), l'usage agricole des sols varie essentiellement en fonction du contexte économique (prix des produits et subventions aux exploitations agricoles) et réglementaire, notamment à travers les formes d'agriculture que les pouvoirs publics soutiennent (agriculture raisonnée, biologique...). Ces dernières années, l'agriculture biologique (AB) s'est considérablement étendue et couvre aujourd'hui 7 % des surfaces rizicoles<sup>1</sup>. D'où l'intérêt d'étudier les conséquences possibles de différents scénarios d'évolution des prix et d'extension de la surface en AB, sur les changements d'usage des sols et notamment sur la surface rizicultivée. Cet article propose une méthode permettant d'estimer les surfaces rizicultivées sous différents scénarios socio-économiques, puis il présente et discute les résultats obtenus.

### La Camargue terre rizicole

D'une superficie de 160 000 hectares, la Camargue est composée d'espaces

<sup>1</sup> Source : Syndicat des riziculteurs de France et filière, données 2012.

naturels et de terres agricoles, dont 32 000 hectares cultivés en céréales. Du fait d'un climat méditerranéen, très venté, chaud et sec en été, le déficit hydrique (pluies – évapotranspiration potentielle [ETP]) est très élevé (500 à 800 mm/an). Cela favorise la remontée par capillarité de l'eau des nappes phréatiques salées, provoquant une salinisation des sols. Le riz irrigué, principale culture en Camargue, permet de lutter contre cette salinisation par la submersion. Il rend ainsi possible, s'il est cultivé pendant un nombre suffisant d'années successives, la désalinisation du sol et l'insertion dans la rotation de cultures pluviales sensibles au sel (le blé dur essentiellement). Cependant, après un certain nombre d'années de pratique de ces cultures non inondées, la salinité des sols atteint à nouveau un niveau critique. Traditionnellement, en Camargue, trois années de riz succèdent à trois années de blé dur. L'eau douce d'inondation des rizières est également utile pour alimenter les milieux naturels constitués de marais et d'étangs (Chauvelon et Mathevet, 2002).

Les acteurs des filières agricoles et les gestionnaires des milieux naturels craignent que la superficie rizicole ne diminue dans l'avenir, du fait : i) de la réforme de la Politique agricole commune (PAC) en 2013, qui pourrait occasionner une diminution des aides à la production rizicole ; ii) de l'irrégularité des prix de vente du riz ; et iii) de la diminution du nombre de matières actives autorisées pour désherber les rizières. Une chute des surfaces rizi-

cultivées s'est déjà produite en Camargue de 1962 à 1981, où la surface rizicole est passée d'environ 32 000 hectares à moins de 5 000 hectares (Mouret *et al.*, 2004). Cette diminution brutale entraîna un déséquilibre hydraulique entre quantités d'eaux douces et d'eaux salées entrant dans le territoire et une salinisation des sols. Face à une nouvelle conjoncture économique, les avis divergent sur l'évolution des systèmes agricoles et sur le développement de l'agriculture biologique (AB). Certains acteurs souhaiteraient que l'ensemble du territoire soit converti en AB, alors que d'autres s'interrogent sur des effets négatifs potentiels d'une conversion intégrale, notamment sur la surface rizicultivée et les équilibres hydrologiques. En effet, la riziculture biologique est contrainte par la pression des adventices. Sans herbicide, l'allongement des rotations (plusieurs années de cultures sans submersion avant le retour du riz) est l'unique solution, mais cela entraîne une proportion de surfaces rizicultivées plus faible qu'en agriculture conventionnelle (AC) (Mouret *et al.*, 2004).

### Évolutions d'usage des sols et décisions d'assolement : choix du modèle d'analyse

Les études portant sur les changements d'usage des sols mobilisent différents types d'approches. Certains auteurs utilisent des données spatialisées d'usage des sols (Pontius *et al.*, 2001 ; Stéphane et Lambin, 2001) à

l'échelle d'un territoire pour identifier les changements probables *via* l'analyse statistique des déterminants des changements passés et une projection de ceux-ci dans le futur. Cette approche ne prend que rarement en compte l'exploitation agricole (Verburg *et al.*, 2006) ; or les agriculteurs sont les décideurs majeurs de l'usage des terres agricoles. D'autres approches utilisent des outils de modélisation pour simuler les décisions d'usage du sol par les agriculteurs ; elles prennent explicitement en compte l'échelle de l'exploitation, et tentent de représenter avec différents formalismes les choix et décisions des agriculteurs (Janssen et van Ittersum, 2007) souvent *via* l'optimisation d'une fonction objectif (par exemple la maximisation de la marge brute). Une autre manière d'aborder les décisions des agriculteurs est de les représenter sous forme d'un modèle composé d'un ensemble de règles de décision (RDD) de type conditionnel (« *si... telle condition... alors... j'agis de telle manière...* »). La construction d'un tel modèle nécessite de comprendre les choix d'assolement des agriculteurs et donc d'identifier les facteurs pris en compte par ceux-ci pour opérer le choix des cultures, des modes de conduite et la répartition de ceux-ci dans le territoire de l'exploitation (Maxime *et al.*, 1995 ; Aubry *et al.*, 1998). C'est cette dernière approche que nous mobilisons ici, car elle se base sur les compromis réalisés par les agriculteurs sans préjuger d'une quelconque fonction d'optimisation.

## Matériel et méthode

Cette étude s'est déroulée en deux phases. Dans un premier temps, une analyse des assolements mis en place chaque année par les agriculteurs a été réalisée pour : i) identifier les facteurs et contraintes influençant le choix des cultures et leur répartition dans le territoire de l'exploitation ; et ii) adapter et informer le modèle de représentation des décisions d'assolement. Dans un second temps, ces informations ont été utilisées pour évaluer les conséquences de quatre scénarios d'évolution du contexte socio-économique et technique sur la superficie rizicole en Camargue.

## Analyse des assolements des agriculteurs, adaptation et information du modèle

Le cadre conceptuel proposé par Schaller *et al.* (2012) considère qu'il est possible de rendre compte des assolements mis en place par les agriculteurs à partir de trois ensembles d'éléments : des règles de décision (RDD), des variables de décision, et des déterminants. Appliquant ce cadre à la Camargue, nous avons été amenés à distinguer sept variables de décision (*encadré 1*) dont les valeurs spécifiques pour une exploitation agricole donnée s'expliquent par des déterminants de différente nature (économique, climatique, édaphique, éloignement...). La variable G résulte de la spécificité de la culture du riz irrigué par submersion. Cette variable est appelée « durée d'un type de culture » (DTC), le type de culture étant soit une culture pluviale (ou irriguée sans submersion longue), soit une culture irriguée par submersion avec présence d'une lame d'eau la plupart du temps.

L'identification et la formalisation des RDD de choix d'assolement ont été réalisées en deux étapes successives. Dans une première étape exploratoire, sept riziculteurs ont été choisis pour le contraste de leur système de production-conduite des cultures et types de sol. L'objectif était de vérifier la pertinence du modèle retenu et de construire la méthode d'investigation pour approcher les variables dites de décision.

Dans un second temps, nous avons cherché à approfondir les caractéristiques biophysiques qui délimitent les marges de manœuvre des agriculteurs en termes de choix d'assolement et à préciser les valeurs effectivement prises par les variables de décision. Pour ce faire, nous avons organisé trois séances de simulation interactive où 14 exploitants volontaires représentant une diversité de systèmes de production, devaient décider de leur assolement pour sept années consécutives, dans un contexte de changement d'aides de la PAC (Delmotte *et al.*, 2013). Ils pouvaient ainsi, virtuellement, modifier les choix de cultures, les assolements et les modes

### Encadré 1

#### Définition des variables de décision identifiées dans l'étude

- A. Hiérarchisation** : liste ordonnée de cultures faite par l'agriculteur et qui dépend de la fonction de chaque culture dans le fonctionnement de l'exploitation.
- B. Zone cultivable** : ensemble des parcelles de l'exploitation sur laquelle une culture est jugée apte à être cultivée en raison du type de sol de la parcelle, de la distance de la parcelle au siège de l'exploitation, de la surface de la parcelle, etc.
- C. Couples précédent-suivant** : couples de cultures qui se succèdent dans le temps sur une même parcelle. On distingue les couples favorables, tolérables et interdits, en fonction d'effets précédents et suivants à favoriser, à éviter ou interdits (Aubry *et al.*, 1998).
- D. Nombre de cycles successifs d'une culture** : nombre de fois successivement où une culture peut être cultivée sur une même parcelle (semée, récoltée, ressemée). Pour les cultures annuelles, le nombre de cycles successifs de culture peut aller de 1 (= la culture ne peut pas être cultivée deux fois de suite sur la même parcelle) à l'infini (= monoculture possible sur une durée indéterminée).
- E. Délai de retour** : nombre d'années au bout duquel une culture peut être à nouveau cultivée sur une même parcelle, après une période d'interruption qui a vu la parcelle être occupée par une autre culture.
- F. Durée d'une culture** : variable spécifique des cultures pluriannuelles (la luzerne, par exemple). Il s'agit de la durée du cycle d'exploitation de la culture, sur plusieurs années (du semis, à la destruction de la culture). Cette durée peut être déclinée en une durée minimale et une durée maximale.
- G. Durée du type de culture (DTC)** : nombre d'années successives où un même type de culture, inondé ou non, est cultivé. La contrainte de salinité est à l'origine de cette variable.

de conduite, et ce pour plusieurs années consécutives et dans différents contextes économiques. L'observation de leurs choix au cours de ces séances de simulation et la conduite *a posteriori* d'entretiens de débriefing auprès de ces 14 agriculteurs ont permis de faire expliciter les raisonnements mobilisés par les participants. Lors de ces entretiens, il a été demandé aux agriculteurs d'opérer la distinction entre (i) ce qu'ils décidaient pour eux, dans leur propre exploitation, et (ii) ce qui était techniquement faisable, hors contraintes socio-économiques. Ce sont donc les avis des agriculteurs sur ce qui est possible ou impossible en termes de successions culturales, de nombre de cycles successifs de culture, de délai de retour, etc.

À l'issue de cette première phase, nous étions en mesure d'attribuer à chaque variable de décision des valeurs justifiées par des déterminants biophysiques, et ce par type de sol, culture et mode de production (AC ou AB).

### Simulation des surfaces rizicoles à l'échelle du territoire pour quatre scénarios contrastés

Nous avons défini quatre scénarios d'évolution possible des systèmes agricoles, nommés A, B, C et D, en croisant deux types de situation :

- une situation économique qui rendrait le riz moins rentable que les autres cultures, que nous comparons à

la situation actuelle où le riz est le plus avantageux économiquement ;

- une alternative technique de mode de production, où la totalité des surfaces agricoles serait en AB, en comparaison à une situation où tout le territoire serait en AC (mobilisant des intrants de synthèse).

Nous avons en outre construit une classification des sols camarguais (*tableau 1*) reposant sur les contraintes biophysiques identifiées dans l'analyse des pratiques d'assolement des exploitants. Quatre catégories, cohérentes avec les distinctions de sols faites par les agriculteurs, ont été retenues :

- les sols limono-argileux et argilo-limoneux hauts (ALH) ;
- les sols sableux hauts (SH) ;
- les sols argilo-limoneux bas (ALB) ;
- et les sols sodiques et hydromorphes (SB).

La *figure 1* présente une carte de la Camargue avec les différents types de sols.

Nous avons ensuite calculé les surfaces rizicultivées pour chaque scénario en mobilisant les valeurs de la variable DTC (*encadré 1*) précédemment identifiées pour les cultures avec et sans submersion. En effet, la variable DTC, qui se décline en valeurs minimum et maximum, appelées par la suite DTCminimum et DTCmaximum, permet de prendre en compte les caractéristiques biophysiques (salinité, pression phytosanitaire) influençant la surface rizicole minimale et maximale dans chaque type de sol et pour chaque mode de conduite. Les calculs ont été effectués par type de

sol puis sommés pour obtenir la surface rizicultivée (*Sriz*) à l'échelle du territoire, selon la formule :

$$S_{riz} = \sum_{i=0}^n \frac{X_i}{(X_i + Y_i)} * S_i$$

Où :

- $S_i$  = surface du type de sol  $i$  ;
- $X_i$  = DTC inondée (minimum ou maximum) pour le type de sol  $i$  ;
- $Y_i$  = DTC non inondée (minimum ou maximum) pour le type de sol  $i$ .

Pour chaque scénario, nous avons estimé la valeur de la surface rizicultivée en utilisant une valeur moyenne ainsi que les valeurs extrêmes de DTCminimum et DTCmaximum (variabilité des réponses des agriculteurs), pour les cultures non submergées et pour le riz inondé (*tableau 2*). Dans les scénarios A et C, où le riz est moins rentable que les autres cultures, on considère que l'agriculteur cherche à minimiser sa part dans l'assolement ; il s'agit donc de calculer la proportion de riz nécessaire pour le maintien de la qualité agronomique des sols (*via* la désalinisation). La surface correspondante est calculée en prenant pour  $X_i$ , la durée minimale du cycle de riziculture et pour  $Y_i$ , la durée maximale du cycle de cultures non inondées. À l'inverse, dans les scénarios B et D, le riz est très rentable et donc l'agriculteur cherche à maximiser la taille de la sole de riz. Pour calculer une part de riz maximale, on utilise pour  $X_i$  la DTCmaximum culture inondée et pour  $Y_i$  la DTCminimum cultures non inondées.

**Tableau 1. Caractérisation des types de sol camarguais.**

Table 1. Characterization of the soil types of Camargue.

Type de sol	Caractéristiques			Surface en Camargue	
	Altitude (m)	Salinité	Taux d'argile	(ha)	(%)
SH	> + 1,5	Faible	Faible	1 711	5
ALH	> + 1,5	Faible	Moyen à élevé	9 834	31
ALB	[0 ; + 1,5]	Moyenne	Élevé	14 403	45
SB	[- 0,5 ; + 0,5]	Forte	Variable	6 181	19
Forte sensibilité à l'hydromorphie					
<b>TOTAL</b>				<b>32 129</b>	<b>100</b>

ALH : sols limono-argileux et argilo-limoneux hauts ; SH : sols sableux hauts ; ALB : sols argilo-limoneux bas ; SB : sols sodiques et hydromorphes.

Source : Inra ; Réserve nationale de Camargue ; Parc naturel régional de Camargue et Syndicat mixte de la Camargue gardoise.

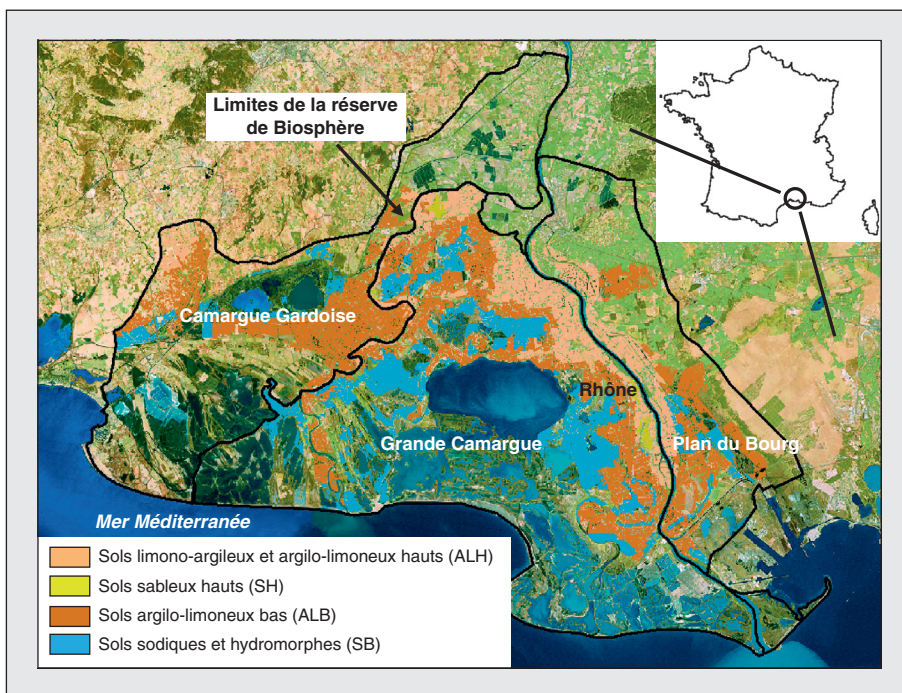


Figure 1. Carte des types de sols camarguais.

Figure 1. Map of Camargue type of soils.

Source : Inra ; Réserve nationale de Camargue ; Parc naturel régional de Camargue et Syndicat mixte de la Camargue gardoise.

## Résultats

### Identification et formalisation des contraintes agronomiques

Malgré la diversité des structures d'exploitation agricole et les diffé-

rentes stratégies des agriculteurs, nous avons pu vérifier la pertinence de notre modèle pour rendre compte des assolements des agriculteurs. Nous avons constaté que, parmi les déterminants (facteurs influençant la valeur des variables du modèle) spécifiés par

les agriculteurs (tableau 3), certains étaient communs et relativement stables dans le temps (indépendants des évolutions, parfois rapides, du contexte socio-économique). Il s'agit des déterminants de nature biophysique, comme par exemple la sensibilité des espèces cultivées à la salinité. De plus, pour chaque variable de décision, nous avons constaté qu'il existait, pour tous les agriculteurs, des valeurs « interdites », délimitant ce qui est acceptable et ce qui est jugé impossible. Nous avons alors attribué à chaque variable une valeur minimale ou maximale, selon la nature de la variable. Par exemple, en agriculture conventionnelle, si un blé sur un sol limoneux argileux ne peut pas être cultivé plus de quatre années successives, à cause des maladies et ce malgré l'usage de produits phytosanitaires, alors le nombre de cycles successifs maximum est égal à 4. Toutefois, pour une même variable de décision, tous les agriculteurs n'apprécient pas de la même manière les contraintes biophysiques. Cela a conduit à proposer, pour chaque variable étudiée, une valeur moyenne et un intervalle défini par les valeurs extrêmes rencontrées parmi les agriculteurs.

Les enquêtes ont permis de préciser la signification de la variable DTC. Pour les riziculteurs, le riz doit revenir dans la rotation à une vitesse qui diffère

Tableau 2. Durée de type de culture (DTC) minimum et maximum (en années) des cultures inondées (riz) et non inondées visée par les agriculteurs de Camargue, en agriculture biologique et en agriculture conventionnelle.

Table 2. Length of crop type (number of years) intended by rice growers in Camargue for dry and irrigated crops, in organic and conventional agriculture.

Types de cultures	Type de sol	Agriculture biologique		Agriculture conventionnelle	
		DTCminimum	DTCmaximum	DTCminimum	DTCmaximum
Cultures non inondées	SH	3 [2 ; 3]	8 [7 ; 9]	2	8 [7 ; 9]
	ALH	3 [2 ; 3]	8 [7 ; 9]	2	8 [7 ; 9]
	ALB	3 [2 ; 3]	3 [3 ; 5]	2	3 [3 ; 5]
	SB	-	-	2	2
Riz inondé	SH	1	2 [1 ; 2]	1	∞
	ALH	1	2 [1 ; 2]	1	∞
	ALB	1	2 [1 ; 2]	1 [1 ; 2]	∞
	SB	-	-	1 [1 ; 2]	∞

- : culture impossible ; ∞ : monoculture de riz autorisée ; ALH : sols limono-argileux et argilo-limoneux hauts ; SH : sols sableux hauts ; ALB : sols argilo-limoneux bas, SB : sols sodiques et hydromorphes.

Valeurs entre crochets : extrêmes rencontrés chez les agriculteurs.

**Tableau 3. Variables de décision et déterminants des choix d'assolement en Camargue.**

Table 3. Decisional variables and determinants of the cropping plan in Camargue.

Catégorie de variable	Variables de décision	Déterminants principaux identifiés
Choix des cultures	Hiérarchisation	Rentabilité (marge brute, primes, contrat, réglementation PAC) <i>Sécurité</i> : économique ( <i>biologique, climatique</i> ) Adaptabilité des ressources productives de l'exploitation (charge de travail, main-d'œuvre, matériel, connaissances techniques) <i>Besoin en eau et coûts eau (irrigation nécessaire, facultative)</i> <i>Adaptabilité terrain (type de sol, hydromorphie, salinité)</i>
Localisation et organisation spatiale des cultures	Zone cultivable d'une culture	<i>Milieu physique</i> { <i>type de sol (texture, fertilité, hydromorphie)</i> <i>salinité</i> <i>État biologique de la parcelle (pression phytosanitaire)</i> Distance/accessibilité de la parcelle Forme/taille de la parcelle Voisinage parcelle et localisation par rapport au siège de l'exploitation Facilité d'irrigation (réseau d'irrigation, vent) Contrat (éligibilité à l'agriculture biologique, Indication géographique protégée [IGP], etc.)
	Regroupement de parcelles	Taille de la sole Distance/accessibilité de la parcelle Voisinage de la parcelle Réseau d'irrigation Mode de conduite (simplifié/intensif)
Organisation temporelle des cultures	Délai de retour d'une culture	Effet précédent à valoriser { <i>amélioration de la structure du sol</i> <i>diminution des risques phytosanitaires</i> <i>diminution du risque de remontée de sel</i> <i>diminution du coût de l'itinéraire technique</i>
		Effet suivant à éviter { <i>augmentation des risques phytosanitaires</i> <i>augmentation du risque de remontée de sel</i> <i>augmentation du coût de l'itinéraire technique</i>
		Contrat
	Couple de cultures précédent-suivant	Effet précédent à valoriser { <i>amélioration de la structure du sol</i> <i>diminution du risque de remontée de sel</i> <i>diminution des risques phytosanitaires</i> <i>diminution du coût de l'itinéraire technique</i>
		Effet suivant à éviter { <i>diminution du rendement</i> <i>augmentation du coût de l'itinéraire technique</i> <i>augmentation des risques phytosanitaires</i>
	Adaptabilité au calendrier de travail (activité exploitant, <i>concordance date récolte-semis...</i> ) Contrat-réglementation	
Nombre de cycles successifs d'une culture	<i>Risques phytosanitaires</i> <i>Vitesse de remontée de sel</i> <i>Diminution du rendement</i> Contrat-réglementation	
Durée d'implantation d'une culture	<i>Risques phytosanitaires</i> <i>Vitesse de remontée de sel</i> <i>Diminution du rendement</i> Contrat-réglementation	
Durée d'un type de culture	<i>Risques phytosanitaires</i> <i>Vitesse de remontée de sel</i> <i>Diminution du rendement</i>	

Construit d'après les travaux de Maxime *et al.* (1995) et de Aubry *et al.* (1998).

En italique, les déterminants biophysiques.

PAC : politique agricole commune.

selon les types de sols, lesquels conditionnent la vitesse des remontées salines. Cette vitesse de retour est inversement corrélée au nombre d'années pendant lesquelles se succèdent des cultures non inondées sur une parcelle donnée, c'est-à-dire à la variable DTC non inondée. Par ailleurs, un nombre de cycles successifs minimum de riz (DTC<sub>minimum</sub> inondée) est nécessaire pour dessaler suffisamment les sols. Un autre intérêt de l'alternance de cultures inondées et non inondées est de contribuer à limiter les risques phytosanitaires et l'enherbement propres à chaque type de culture en modifiant les conditions du milieu (aérobie ou anoxique).

Les sols hauts (ALH et SH), moins sensibles aux problèmes d'hydromorphie et de salinité, peuvent supporter plusieurs années consécutives de cultures non inondées (jusqu'à dix ans selon certains agriculteurs). À l'inverse, les sols bas (ALB et SB) doivent revenir plus fréquemment en riz. Les sols très argileux (ALB) sont moins favorables à l'implantation des cultures non inondées (notamment les cultures d'hiver comme le blé dur), mais conviennent à la culture du riz. Ainsi, les parcelles doivent revenir en riz au minimum tous les quatre à six ans sur les terres ALB et plus fréquemment encore sur sols SB, afin de gérer la salinisation.

Le mode de conduite influe sur la valeur prise par la DTC<sub>minimum</sub>. En effet, l'état d'enherbement d'une parcelle est un déterminant majeur du rendement potentiel d'une culture en AB, où les désherbants chimiques sont

bannis. En conséquence, le délai de retour du riz est plus long en AB, où il convient de faire au minimum deux ou trois ans de cultures non inondées avant de refaire du riz, alors que le riz peut être cultivé de façon continue en agriculture conventionnelle. De plus, les sols SB sont plus difficiles à cultiver en AB du fait de la nécessité de cultiver du riz fréquemment (pour dessaler), alors que la pression des adventices impose un délai de retour. Certains agriculteurs estiment que cultiver du riz en AB est impossible sur sol SB alors que d'autres considèrent que la riziculture y est possible, en alternance avec des jachères ou des prairies. Pour la suite de l'analyse, nous avons considéré la culture biologique du riz comme impossible sur les sols SB.

### Évaluation de la surface rizicultivée en Camargue pour quatre scénarios

Le *scénario A* considère toute la riziculture en mode biologique dans une situation où la culture du riz serait peu rentable. Dans ce cas, et compte tenu de la variabilité des réponses des riziculteurs, la riziculture occuperait entre 3 555 et 5 044 hectares (*tableau 4*).

Dans le cas du *scénario C* qui diffère du scénario A par le mode de conduite conventionnel, la surface rizicole varierait entre 5 615 et 7 104 hectares. La non-culture des sols bas salés (19 % du territoire étudié) en AB explique les différences de valeurs entre ces

deux scénarios. La variabilité des réponses des riziculteurs se traduit par une différence de l'ordre de 2 000 hectares entre le minimum et le maximum de surface rizicole pour ces deux scénarios.

Le *scénario D* considère la situation où le riz est plus rentable que les autres cultures, et où l'ensemble des surfaces en Camargue sont en AC. La monoculture de riz étant possible sur tous les types de sol, l'ensemble de la surface cultivée de la région pourrait être en riz, soit une surface maximale de 32 129 hectares.

En AB (*scénario B*), la surface maximale en riz varierait entre 6 487 et 12 974 hectares, selon que des solutions techniques seraient identifiées ou non pour cultiver du riz deux années de suite. Même dans ce cas, la surface en riz n'excéderait pas 40 % de la surface cultivée totale. La nécessité d'allonger la rotation en intégrant une ou plusieurs années de cultures non inondées afin de rompre le cycle des adventices du riz est le facteur limitant la surface en riz biologique.

## Discussion-Conclusion

La surface maximale en riz estimée dans le scénario D est très proche de celle qui est effectivement observée au maximum de la production rizicole camarguaise dans les années 1960, environ 33 000 hectares (Agreste, 1990). À cette époque, le riz était entièrement en AC, avec des prix de vente attractifs, caractéristiques qui sont à la base du scénario D. Cela

**Tableau 4. Résultats des scénarios évalués (A, B, C et D).**

Table 4. Results of scenarios (A, B, C, and D).

		Scénarios économiques	
		Faible attractivité économique du riz	Forte attractivité économique du riz
Scénarios techniques	Modèle agriculture biologique	A 4 884 hectares [3 555-5 044] 15 % [11-16 %]	B 10 379 hectares [6 487-12 974] 32 % [20-40 %]
	Modèle agriculture conventionnelle	C 6 944 hectares [5 615-7 104] 21 % [17 %-22 %]	D 32 129 hectares 100 %

Surface totale en riz cultivé (en hectares) et pourcentage par rapport à la surface agricole utile (SAU) régionale pour différents scénarios (valeur moyenne et variabilité tenant compte de la diversité des réponses).



indique une bonne prédictibilité du modèle développé. Il faut noter qu'à cette époque, la surface rizicultivée dépassait celle qui est nécessaire pour éviter la salinisation des sols.

La surface agricole utile de la Camargue est d'environ 45 000 hectares. Si l'on considère, à partir des données de suivi de la salinité (Mouret *et al.*, 2004), qu'en moyenne, il ne faut pas dépasser 3 à 4 ans de cultures non inondées pour éviter des remontées salines pénalisantes, cela signifie que la surface rizicultivée devrait être comprise entre 19 000 et 22 000 hectares. La superficie en riz en 2013 est de 21 000 hectares, dans un contexte où le riz est économiquement attractif (primes compensatoires de la PAC). Cependant les difficultés techniques rencontrées pour le contrôle des adventices (du fait de la réduction des matières actives autorisées), ainsi que les pressions et contraintes environnementales, ne permettent pas d'aller au-delà.

Les simulations des surfaces rizicoles minimales, dans le cas d'une agriculture conventionnelle (scénarios C) sont proches du minimum historique de 1981, lorsque le riz était peu rentable (environ 5 000 hectares), montrant encore la pertinence du modèle. Or, à cette époque, des problèmes de salinisation des sols avaient été observés (Heurteaux, 1990).

Pour le scénario maximisant la surface rizicole d'une agriculture totalement biologique (scénario B) on obtient une surface en riz comprise entre 6 500 et 13 000 hectares. Dans les conditions de maîtrise technique actuelle des systèmes en AB, la surface serait plus proche de la valeur minimum calculée, ce qui aurait de nombreuses conséquences sur les sols, comme dans le cas des scénarios A et C. Cependant, si des progrès techniques étaient réalisés et qu'il était possible de cultiver du riz deux ans de suite, la surface rizicultivée pourrait atteindre 13 000 hectares. Il existe donc un enjeu fort pour le développement de techniques rizicoles biologiques permettant la culture du riz deux années de suite. À partir des discussions menées avec les agriculteurs, et en considérant la variabilité des types de sol, il apparaît que cette superficie de 13 000 hectares serait suffisante pour maintenir les sols dans des conditions satisfaisantes de fertilité et cela pour deux raisons : i) certains

sols sont peu ou pas salés et sur ceux-ci il est possible de pratiquer des cultures sans submersion pendant 7 à 9 ans ; et ii) les riziculteurs en AB sont capables d'adapter leur système de production pour minimiser les problèmes de salinité (mise en place de prairies, cultures fourragères, jachères...), voire s'en affranchir. Cependant, une telle diminution des surfaces en riz ne serait pas sans conséquences sur la filière (volume de riz moindre pouvant mettre en péril les coopératives spécialisées) ni peut-être sur le fonctionnement hydrologique et environnemental du delta, compte tenu de l'interdépendance entre espaces cultivés et espaces naturels et de l'impact des eaux de drainage des rizières sur la hauteur et la salinité des étangs centraux du delta (Heurteaux, 1990).

Le cadre conceptuel proposé pour représenter les décisions techniques des agriculteurs était jusqu'ici utilisé pour accompagner des agriculteurs dans leur prise de décision individuelle. En Camargue, ce cadre s'est révélé pertinent pour représenter la manière dont chaque agriculteur organise ses propres assolements et pour en repérer les déterminants, mais il a aussi permis d'évaluer les conséquences régionales de scénarios contrastés d'évolution du système agraire. Du fait de la diversité des exploitations agricoles, et de la difficulté de prédire comment elles adapteraient leurs pratiques agricoles en cas de changement de contexte économique ou réglementaire, les scénarios évalués doivent être très contrastés. Évaluer des scénarios plus fins (comme une diminution du prix du riz) nécessiterait des méthodes plus économiques. On peut toutefois souligner l'intérêt de l'approche que nous avons développée pour faire réfléchir collectivement les agriculteurs et leurs responsables sur les conséquences de certains grands choix d'orientation agricole. Les scénarios à évaluer mériteraient cependant d'être élaborés avec les acteurs locaux. Les soumettre à d'autres acteurs du territoire (coopératives, vendeurs d'intrants, gestionnaires des milieux naturels, collectivités territoriales...) ayant des points de vue et intérêts possiblement divergents quant à la place de l'agriculture, amènerait d'autres sources de connaissances pour évaluer ces scénarios. ■

## Remerciements

Ces travaux ont bénéficié du soutien financier de l'Agence nationale de la recherche (ANR), programme SYSTERRA : projet PERFCOM ANR-08-STRA-11).

## Références

- Agreste, 1990. Riziculture française métropolitaine. La relance se confirme. Recensements agricoles : 1970, 79 et 88. *Agreste Statistique Agricole Languedoc Roussillon* (90-04) : 20 p.
- Aubry C, Papy F, Capillon A, 1998. Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agricultural Systems* 56 : 45-65. doi: 10.1016/S0308-521X(97)00034-6
- Chauvelon P, Mathevet R, 2002. Carrefour des eaux à l'interface nature-société: l'hydrosystème camarguais. *Faire Savoirs* 2 : 57-64.
- Delmotte S, Lopez-Ridaura, S, Barbier JM, Wery J, 2013. Participatory scenario assessment of alternative agricultural systems from farm to regional level: comparison of three modeling approaches. *Journal of Environmental Management* 129 : 493-502. doi : 10.1016/j.jenvman.2013.08.001.
- Janssen S, van Ittersum MK, 2007. Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. *Agricultural Systems* 94 : 622-36. doi: 10.1016/j.agsy.2007.03.001
- Heurteaux P, 1990. Irrigation et drainage en riziculture camarguaise : conséquences écologiques. *Euroryza* 1 : 49-53.
- Maxime F, Mollet JM, Papy F, 1995. Aide au raisonnement de l'assolement en grande culture. *Cahiers Agricultures* 4 : 351-62.
- Mouret JC, Hammond R, Dreyfus F, Desclaux D, Marnotte P, Mesleard F, 2004. An integrated study of the development of organic rice cultivation in the Camargue (France). In : Ferrero A, Vidotto F, eds. *Challenges and opportunities for sustainable rice-based production system*. Proceedings of the conference, 13-15 septembre 2004, Torino (Italie). Vercelli (Italie): Edizioni Mercurio.
- Pontius RG Jr, Cornell JD, Hall CA, 2001. Modeling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD2: application and validation for Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85 : 191-203. doi: 10.1016/S0167-8809(01)00183-9
- Schaller N, Lazrak EG, Martin P, Mari JF, Aubry C, Benoit M, 2012. Combining farmers' decision rules and landscape stochastic regularities for landscape modelling. *Landscape Ecology* 27 : 433-46. doi: 10.1007/s10980-011-9691-2
- Stéphanne N, Lambin EF, 2001. A dynamic simulation model of land-use changes in Sudano-sahelian countries of Africa (SALU). *Agriculture, Ecosystems and Environment* 85 : 145-61. doi: 10.1016/S0167-8809(01)00181-5
- Verburg PH, Rounsevell MDA, Veldkamp A, 2006. Scenario-based studies of future land use in Europe. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 114 : 1-6. doi: 10.1016/j.agee.2005.11.023