



THESE
pour l'obtention du titre de
DOCTEUR de Montpellier SupAgro

Ecole doctorale : Systèmes Intégrés en Biologie, Agronomie, Géosciences, Hydrosiences et
Environnement
Filière : Ecosystèmes
Discipline : Agronomie

**Evaluation participative de scénarios : quelles perspectives
pour les systèmes agricoles camarguais ?**

Par Sylvestre Delmotte

Thèse dirigée par **Jacques Wery**, et co-encadrée par **Santiago Lopez Ridaura**, **Jean Marc Barbier** et **Jean Claude Mouret**

présentée et soutenue publiquement le 19 décembre 2011

Devant le jury :

Jacques-Eric Bergez , Directeur de recherche, INRA	Rapporteur
Philippe Martin , Maître de conférences, AgroParisTech	Rapporteur
Martine Antona , Chercheur, CIRAD	Examinatrice
Christian Gary , Directeur de recherche, INRA	Examineur
Santiago Lopez Ridaura , Chargé de recherche, INRA	Co directeur de thèse
Jacques Wery , Professeur, Montpellier SupAgro	Directeur de thèse



Bourse de thèse : INRA-SAD et ADEME
Laboratoire d'accueil : UMR Innovation 951



*A Manco,
qui me demande toujours : « Comment va ton riz ? »*

Merci !

Bon, j'avoue, j'ai triché. Je n'ai pas fait cette thèse tout seul. En fait, on était même plusieurs.

Santiago, je pense que tu mérites le titre de guide suprême de ce travail, par ton investissement, ton enthousiasme et ta détermination. Amigo Santo, mille mercis pour tous ces bons moments de discussion, de terrain, de rédaction, de stress, d'analyse et d'amitié passés ensemble, parfois au détriment du sommeil, mais toujours dans la joie et l'optimisme. Merci d'avoir pris très à cœur ton rôle de militant de la recherche. Après 3 ans, penses-tu avoir réussi à me transmettre ton virus ?

Jean-Claude, papa de labo, rien n'aurait été possible sans toi, tu le sais. Merci pour ton aide et ta disponibilité à toutes les étapes de ce travail, pour les moqueries et railleries, pour les discours enflammés sur la Camargue et pour la découverte de l'Estrambord.

Jean-Marc, je suis sincèrement admiratif de ta capacité à prendre du recul. Merci pour tes innombrables conseils avisés et pour tes relectures détaillées qui pointent là où ça fait mal.

Enfin, Jacques. Merci de t'être embarqué dans cette galère, d'avoir su diriger d'une main de fer des comités de thèse dont je ne contrôlais rapidement plus grand chose, d'avoir été disponible à chaque fois que cela était nécessaire pour les décisions stratégiques, et finalement d'avoir relu la moitié de la thèse en moins de trois jours!

Je voudrais sincèrement vous remercier tous les quatre pour le formidable encadrement que vous avez su réaliser ! Je ne pouvais et ne peux pas rêver de mieux. Merci.

Un grand merci également aux membres du jury qui ont accepté d'évaluer cette thèse. Je remercie Philippe Marin et Jacques-Eric Bergez d'avoir accepté de rapporter ce manuscrit, et merci Martine Antona et Christian Gary d'avoir accepté d'évaluer ma thèse.

Cette thèse a bénéficié d'un comité de thèse : messieurs les encadrants, auxquels s'ajoutent Robert Lifran, Raphaël Mathevet, Pablo Tittonell, Christophe Soulard, Régis Vianet et Christophe Le Page, j'ai eu un sincère plaisir à discuter avec vous des orientations à donner à mon travail. Merci également d'avoir pris du temps en dehors de ces comités pour de multiples échanges.

Cette thèse a également bénéficié de nombreuses discussions avec des collègues et amis que je souhaite sincèrement remercier : Michel Etienne et de nombreux membres du collectif ComMod, François Purseigle, Stéphane Bellon, Servane Penvern, Philippe Chauvelon et Simone De Hek. Je voudrais également remercier toute l'équipe organisatrice des journées

des doctorants du SAD, ainsi que les doctorants, pour les discussions à la fois profondes et fructueuses qui ont eu lieu lors de ces séminaires.

Un grand merci également à l'ADEME, au département SAD de l'INRA ainsi qu'au Comité interne en Agriculture Biologique, de nous avoir accordé leur confiance en finançant cette thèse.

En parallèle des réflexions théoriques, des travaux en Camargue et au bureau ont souvent fait déborder l'agenda. Je voudrais revenir sur les différentes étapes de ce travail de manière chronologique pour remercier sincèrement tous les participants.

En 2009 des expérimentations ont été conduites chez des agriculteurs et à la station expérimentale de Mauguio avec l'aide de Roy Hammond, d'Amel Kichou et de Soeng Vay, stagiaires à l'UMR Innovation. Merci beaucoup Roy pour tous les coups de main que tu nous as donnés, et pour ta bonne humeur et ton humour ! Merci Soeng et Amel pour le sérieux avec lequel vous avez pris en charge ces expérimentations. Et un grand merci aux agriculteurs : MM. Cartier, Poulette, Filipin, Monmejean et Megias.

En 2010, un travail d'acquisition des données SIG a été réalisé avec l'aide de Bertrand Chaussat. Merci beaucoup Bertrand pour ta rigueur ! Merci également à P. Isenmann, C. Brochier, A. Sandoz et N. Pourpe de nous avoir mis à disposition leurs données. Toujours en 2010, des entretiens ont été conduits avec des acteurs du territoire que je souhaiterais également remercier de m'avoir fait part de leur visions de la Camargue : il s'agit de C. Mundler, C. Toutain, P. Chauvelon, F. Callet, B. Van de Putte, E. Coulet, P. Pace, R. Vianet, A. Vadon, S. Marche, M. Thomas, M. Nadéo, M. Lacrotte, M. Griotto, E. Boy et D. Villenave. Des agriculteurs ont été enquêtés en 2010 par Laure Le Quéré et Angèle Hérault, stagiaires à l'UMR Innovation. Merci beaucoup à vous deux pour tout le travail de collecte et mise en forme de données que vous avez fait ! Merci également aux agriculteurs qui ont accepté de vous recevoir : Mrs Arnaudo, Cavalier, Fabre, Gautier, Megias, Poujol et Vadon. Merci également à M. Gay, enquêté fin 2010, et qui a subi des appels téléphoniques fréquents pour des informations précises. Merci également à Stéphane Jezequel, Max Haeffliger et Stéphane Martin pour toutes les informations que vous m'avez transmises, et un grand merci à Stéphane pour avoir accepté de se plonger dans la base de données pour la vérifier avec moi... travail de longue haleine, merci Stéphane.

Merci beaucoup à Robert Lifran et Mélanie Jaeck d'avoir mis à ma disposition leurs données. Là-dessus, Gaël, tu es arrivé pour m'aider à analyser toutes ces données... Merci beaucoup pour ton aide et ton expertise qui nous ont sauvés de nombreuses fois !

Entre fin 2010 et début 2011, de nombreuses réunions ont été réalisées avec B. Van De Putte et F. Callet pour l'analyse des données, la proposition d'une typologie des exploitations agricoles camarguaises, ainsi que pour l'organisation des séances d'évaluation de scénarios avec des agriculteurs. Merci beaucoup à vous deux et au personnel du SRFF pour l'ensemble des échanges que nous avons eus.

L'évaluation des scénarios avec les agriculteurs a mobilisé une belle équipe. Tout d'abord Christophe Le Page, qui s'est investi corps et âme pour m'apprendre à manipuler Cormas et m'aider à formaliser comment ces séances allaient se dérouler. Un grand merci Christophe, je garde un très bon souvenir de mon passage au Green, des pauses café et de la salle stagiaire ! Nicolas Castanier a travaillé bien tard les veilles de ces réunions pour nous aider à installer le réseau informatique. Merci Nicolas ! Et puis Florine était là, cachée dans l'ombre et assistée par Gaël, à observer les agriculteurs pour comprendre comment ils prenaient leur décision. Merci beaucoup Florine pour tout le travail accompli, pour ton sérieux et tes talents en cuisine. Enfin, un grand merci à tous les agriculteurs qui ont participé à ces séances. Il s'agit de MM. Allard, Benoit, Callet, Decroocq, De La Houpliere, Emanuel, Filippin, Gay, Guillot, Jalabert, Pujol, Roussel et fils, M. et Mme Vistel et M. Santucci.

Enfin, vient le temps du développement du modèle bioéconomique avec quelques acteurs du territoire. Merci beaucoup Fanny d'avoir pris en charge une bonne partie de ce travail, pour tous les échanges que nous avons eus, et finalement pour les fruits du jardin. Un grand merci également aux acteurs qui se sont investis dans phase de l'étude : Benjamine Van De Putte, François Callet, Pascal Madar, Denis Villenave, Régis Vianet, Anne Vadon, Carole Toutain et Jean-Noel Fourcade. Pendant ce temps-là, l'ami Nidal Abdelkrim travaillait sans relâche à l'amélioration des connaissances sur les rendements du blé-dur. Merci Nidal !

Voilà, c'est la fin de la thèse... mais non, jusqu'au bout il aura fallu être nombreux. Un grand merci aux amis qui ont relu des chapitres : Julien, Valérie, Matthieu et Caro, Delphine.

Merci également à tous les amis et collègues avec qui nous avons partagé du bon temps, notamment Sarah et Gatien de la salle Camargue. Un grand merci à Annie, maman de labo, pour la gestion impeccable des budgets et autres tracasseries !

Merci maman pour les corrections ! Merci papa pour les beaux dessins qui agrémentent ce manuscrit ! Et merci frangin pour ton accueil à répétition lors des séjours parisiens... !

Enfin, un grand merci à ma Fanny qui a supporté les sauts d'humeurs et moments de stress intenses, et qui m'a toujours encouragé.

Sommaire

CHAPITRE 1 : INTRODUCTION GENERALE	13
1. ÉVALUATION DES SYSTEMES AGRICOLES : ENJEUX METHODOLOGIQUES.....	13
1.1. Évaluation de systèmes de production agricoles et évaluation de scénarios : le territoire comme échelle intermédiaire	13
1.2. Besoin de démarches pour l'évaluation participative, multicritères, multi-échelles, et prospective des systèmes de production agricoles.....	15
2. LA CAMARGUE : UN TERRITOIRE AGRICOLE OU LES RELATIONS AGRICULTURE/ENVIRONNEMENT SONT ETROITES.....	19
2.1. Quelques éléments d'histoire et de contexte socio-économique de la Camargue.....	19
2.1. Les systèmes agricoles camarguais	23
2.2. Enjeux actuels de l'agriculture et de l'environnement en Camargue.	28
2.3. Continuité des actions de recherche en Camargue dans laquelle s'inscrit ce projet de thèse.....	29
3. OBJECTIFS ET PLAN DE LA THESE	30
CHAPITRE 2 : EVALUATION INTEGREE ET PARTICIPATIVE DE SYSTEMES AGRICOLES AUX ECHELLES DE L'EXPLOITATION ET DE LA REGION	37
PARTICIPATORY INTEGRATED ASSESSMENT OF AGRICULTURAL SYSTEMS FROM FARM TO REGIONAL LEVEL	39
1. INTRODUCTION.....	40
1.1. Agricultural systems assessment at different scales	40
1.2. Evaluating scenarios of agricultural change: The need for a Participative, Integrated, Multiscale and Prospective Assessment of Agricultural Systems (PIMPAAS).....	42
2. REVIEW OF EXISTING APPROACHES FOR PIMPAAS.....	45
2.1. Land Use / Land Cover Change models.....	45
2.2. Bio Economic Models	50
2.3. Agent-Based Models	54
2.4. Comparison of land use change, agent based and bioeconomic models for PIMPAAS	58
3. COMBINED APPLICATIONS OF THE THREE APPROACHES FOR PIMPAAS.....	61
4. CONCLUSION: COMBINING LUCC, BEM, AND ABM FOR PIMPAAS?.....	62
CHAPITRE 3 : ENGAGEMENT DES ACTEURS : QUELQUES ELEMENTS METHODOLOGIQUES MIS EN ŒUVRE DANS LE CADRE DE L'ÉVALUATION PARTICIPATIVE DE SCENARIOS D'ÉVOLUTION DE L'AGRICULTURE EN CAMARGUE.....	69
1. INTRODUCTION : FINALITES DES RECHERCHES PARTICIPATIVES	69
2. MATERIELS ET METHODES	72
2.1. Conception a priori du dispositif de participation.....	72
2.2. Identification des acteurs camarguais (Phase 1).....	73
2.3. Engagement des acteurs dans la démarche et acquisition d'informations pour la conception des scénarios.....	77
2.4. Choix des indicateurs à calculer à partir des simulations.....	82
3. RESULTATS DE LA PHASE 1 : ENGAGEMENT DES ACTEURS.....	83
3.1. Identification des échelles spatiales et temporelles.....	83
3.2. Changements identifiés pour l'évolution de l'agriculture camarguaise.....	84
3.3. Critères et indicateurs pour évaluer les scénarios	87
4. APPORTS ET LIMITES DE LA PHASE 1 DE LA DEMARCHE ET CHOIX D'ORIENTATIONS STRATEGIQUES POUR L'ÉVALUATION DE SCENARIOS.....	91

CHAPITRE 4 : CARACTERISATION DES SYSTEMES CEREALIERES CAMARGUAIS A DE MULTIPLES ECHELLES..... 95

1.	ECHELLE DE LA PARCELLE : DEFINITION DES ACTIVITES.....	95
1.1.	<i>Les sols.....</i>	97
1.2.	<i>Les cultures.....</i>	100
1.3.	<i>Les précédents culturaux.....</i>	101
1.4.	<i>Les modes de conduite.....</i>	101
1.5.	<i>Les niveaux d'utilisation d'intrants.....</i>	101
2.	ECHELLE DE L'EXPLOITATION AGRICOLE : PROPOSITION D'UNE TYPOLOGIE DES EXPLOITATIONS.....	102
2.1.	<i>Proposition d'une typologie des exploitations rizicoles de Camargue.....</i>	104
2.2.	<i>Résultats : description des types d'exploitation.....</i>	106
3.	CARACTERISATION DES SYSTEMES A L'ECHELLE REGIONALE.....	108
3.1.	<i>Limites du territoire camarguais et des sous-régions.....</i>	108
3.2.	<i>Caractérisation des périmètres des associations syndicales autorisées (ASA) de gestion de l'irrigation et de l'assainissement.....</i>	109
3.3.	<i>Spatialisation de la typologie pour l'agrégation à l'échelle de la région.....</i>	112
4.	APPORTS ET LIMITES DES CARACTERISATIONS DES SYSTEMES.....	116
4.1.	<i>Caractérisation des systèmes à l'échelle de la parcelle.....</i>	116
4.2.	<i>Caractérisation des systèmes à l'échelle de l'exploitation.....</i>	117
4.3.	<i>Caractérisation des systèmes à l'échelle du territoire.....</i>	118

CHAPITRE 5 : DESCRIPTION QUANTITATIVE DES ACTIVITES AGRICOLES PAR ENQUETES, BASE DE DONNEES, EXPERTISE ET MODELISATION. 121

1.	POSITIONNEMENT DU PROBLEME.....	121
2.	DESCRIPTION DES ITINERAIRES TECHNIQUES DES ACTIVITES CEREALIERES : PREMIERE APPROCHE PAR ENQUETES.....	123
2.1.	<i>Description des itinéraires techniques.....</i>	123
2.2.	<i>Evaluation des coûts des intrants.....</i>	123
2.3.	<i>Evaluation du temps de travail par opération culturale.....</i>	124
2.4.	<i>Evaluation des consommations de carburant.....</i>	125
2.5.	<i>Evaluation des coûts de mécanisation.....</i>	125
3.	ANALYSE D'UNE BASE DE DONNEES REGROUPANT LES PRATIQUES DE FERTILISATION ET DE PROTECTION PHYTOSANITAIRE EN PRODUCTION RIZICOLE.....	126
4.	ANALYSE D'UNE BASE DE DONNEES ISSUE D'EXPERIMENTATIONS EN CAMARGUE.....	127
5.	ACQUISITION ET FORMALISATION DE DIRE D'EXPERTS.....	153
5.1.	<i>Démarche suivie.....</i>	153
5.2.	<i>Exemple de résultats : rendements du blé-dur.....</i>	155
6.	MODELISATION DES SYSTEMES DE CULTURE.....	157
6.1.	<i>Matériel et méthode : l'exemple du blé-dur.....</i>	158
6.2.	<i>Résultat : simulation du rendement du blé-dur.....</i>	159
7.	RESULTATS ET DISCUSSION DES DONNEES OBTENUES POUR CARACTERISER LES ACTIVITES.....	161
7.1.	<i>La base de données obtenue.....</i>	161
7.2.	<i>Analyse des résultats : comparaison des différents indicateurs.....</i>	163
8.	RESULTATS ET DISCUSSION DES METHODES D'ACQUISITION DES DONNEES POUR CARACTERISER LES ACTIVITES.....	166
8.1.	<i>Apports et limites de la description quantitative des activités agricoles.....</i>	166
8.2.	<i>Retour sur les différentes méthodes employées.....</i>	168

CHAPITRE 6 : UN MODELE MULTI-AGENT POUR L'EVALUATION PARTICIPATIVE ET INTEGREE DE SYSTEMES AGRICOLES A DES ECHELLES MULTIPLES : APPLICATION A LA REFORME DE LA PAC EN CAMARGUE 173

A MULTI-SCALE AGENT-BASED MODEL FOR PARTICIPATORY INTEGRATED ASSESSMENT OF AGRICULTURAL SYSTEMS: APPLICATION TO THE CAP REFORM IN CAMARGUE (SOUTH OF FRANCE)..... 175

1. INTRODUCTION.....	176
2. MATERIAL AND METHODS	179
2.1. <i>The Camargue case study</i>	179
2.2. <i>The IMPASIAS model</i>	180
2.3. <i>Use of the IMPASIAS model to evaluate a scenario of CAP reform</i>	188
3. RESULTS OF THE INTERACTIVE SIMULATIONS SESSIONS	192
3.1. <i>Scenario analysis at farm scale</i>	192
3.2. <i>Scenario analysis at regional scale</i>	197
4. DISCUSSION	201
5. CONCLUSIONS	205

CHAPITRE 7 : EVALUATION INTEGREE DE SCENARIOS RELATIFS AUX SYSTEMES AGRICOLES A DES ECHELLES MULTIPLES : DEVELOPPER UN MODELE BIOECONOMIQUE AVEC LES ACTEURS LOCAUX EN CAMARGUE..... 211

INTEGRATED ASSESSMENT OF SCENARIOS FOR AGRICULTURAL SYSTEMS AT DIFFERENT SCALES: BUILDING A BIO ECONOMIC MODEL WITH STAKEHOLDERS IN CAMARGUE, SOUTH OF FRANCE..... 212

1. INTRODUCTION, SCENARIOS ASSESSMENT WITH LOCAL STAKEHOLDERS	214
1.1. <i>Bio-economic models for scenario assessment</i>	214
1.2. <i>Bio-economic models and stakeholders</i>	215
2. PARTICIPATORY SCENARIOS ASSESSMENT AT DIFFERENT LEVELS WITH A BEM: AN ADAPTIVE PROCESS	217
3. CO BUILDING SCENARIOS AND A REGIONAL BEM WITH LOCAL STAKEHOLDERS IN CAMARGUE.....	218
3.1. <i>The Camargue region and the stakeholders engaged</i>	218
3.2. <i>Phase 1: Presentation of the BEM principles</i>	221
3.3. <i>Phase 2: Scenarios definition and model development</i>	222
3.4. <i>Selection of the scenarios</i>	223
4. SCENARIOS ASSESSMENT WITH LOCAL STAKEHOLDERS.....	225
4.1. <i>Scenarios assessment by local stakeholders</i>	226
4.2. <i>Stakeholders points of view related to each scenario</i>	231
5. DISCUSSION AND CONCLUSION.....	234
5.1. <i>Stakeholders evaluation of the approach</i>	234
5.2. <i>About the scenarios of evolution of agriculture in Camargue</i>	237
5.3. <i>Final remarks and further research</i>	238

CHAPITRE 8 : DISCUSSION GENERALE 251

1. ANALYSE CRITIQUE DE LA DEMARCHE DE CONSTRUCTION ET D'EVALUATION DE SCENARIOS	251
1.1. <i>Phase 1 : Identification et engagement des acteurs, définition des scénarios, critères et indicateurs</i>	251
1.2. <i>Caractérisation des systèmes agricoles à différentes échelles et description quantitative des activités agricoles : phases 2 et 3</i>	256
1.3. <i>Développement des outils de simulation et co-évaluation des scénarios : phases 4 et 5</i>	261
2. APPORTS ET LIMITES DE L'APPROCHE MISE EN ŒUVRE POUR LES ACTEURS CAMARGUAIS	266
2.1. <i>L'évaluation collective de scénarios</i>	266

2.2.	<i>Poursuite des activités en Camargue.....</i>	272
3.	CONCLUSION : APPORTS ET LIMITES DE L' APPROCHE PIMPAAS.....	274
3.1.	<i>Participation des acteurs locaux.....</i>	274
3.2.	<i>Intégration de connaissances et prise en compte d'objectifs multiples.....</i>	275
3.3.	<i>Prise en compte d'échelles multiples.....</i>	276
3.4.	<i>Propriétés pour une étude prospective.....</i>	277
	REFERENCES.....	279
	LISTE DES FIGURES.....	297
	LISTE DES TABLEAUX.....	299
	LISTE DES ABREVIATIONS	301
	ANNEXES	303

Chapitre 1 : Introduction générale

1. Évaluation des systèmes agricoles : enjeux méthodologiques

1.1. Évaluation de systèmes de production agricoles et évaluation de scénarios : le territoire comme échelle intermédiaire

Les systèmes de production agricoles (SPA¹) sont en constante évolution, sous les effets de multiples déterminants, et notamment :

- les évolutions rapides des stratégies et des moyens mis en place par les agriculteurs ;
- le développement de systèmes agricoles alternatifs par la recherche et/ou les agriculteurs ;
- les modifications de stratégies des acteurs de l'agriculture (des filières et de la gestion d'un territoire) ;
- les nouveaux enjeux sociétaux en lien avec l'agriculture (Meynard, 2008) ;
- les variations des marchés, des prix et des politiques publiques.

Ces changements sont rapides, souvent simultanés et leurs impacts sont difficiles à anticiper. L'évaluation *ex ante* des impacts de ces changements est devenue une étape souhaitée, sinon indispensable avant la proposition aux agriculteurs de nouveaux systèmes de culture. Elle est également nécessaire avant la mise en place de politiques publiques (locales, nationales ou internationales) qui permettent l'insertion de ces systèmes dans les SPA actuels ou qui améliorent les performances et la durabilité des SPA.

Deux grandes familles de démarche existent pour la conception et l'évaluation de systèmes innovants (Meynard, 2008) :

- Les démarches dites « pas-à-pas » qui consistent en des cycles successifs de conception/expérimentation/évaluation de systèmes de culture. Ces démarches produisent souvent des systèmes issus de modifications des systèmes existants.

¹ Nous utilisons le terme « système de production agricole » pour désigner les exploitations agricoles et les systèmes de production qui y sont mis en œuvre (culture, animaux, itinéraires techniques, etc.), ainsi que le contexte socio-économique au sens large (l'exploitant et ses objectifs, les entreprises locales avec qui l'exploitation échange des biens, etc.) qui y est associé.

- Les démarches de conception/évaluation dites « *de novo* », qui sont plus exploratoires et orientées sur l'identification de nouveaux systèmes en rupture avec les systèmes existants.

Dans les démarches pas-à-pas, l'évaluation des SPA a fait l'objet de multiples développements, et notamment de démarches normatives utilisées par des chercheurs et des conseillers agricoles pour évaluer la durabilité des systèmes à partir d'indicateurs ou d'indices agrégés : par exemple les méthodes IDEA (Vilain, 2008), INDIGO (Bockstaller *et al.*, 2007) ou MESMIS (Lopez Ridaura *et al.*, 2002). Cependant, ces démarches, quand elles sont basées sur un groupe d'indicateurs prédéfinis, ou d'indices composés dont les poids entre les indicateurs sont également prédéfinis, ne prennent souvent pas en compte les spécificités territoriales des SPA (Barbier *et al.*, 2010). De récents développements tentent d'intégrer les spécificités territoriales dans la définition de pondérations entre les indicateurs, plutôt centrés sur l'échelle de la parcelle et de l'exploitation (Sadok *et al.*, 2009). Néanmoins, ces démarches ne permettent souvent pas de prendre en compte dans l'évaluation des SPA des visions de changements de contexte ou de changements radicaux du futur.

Les démarches de conception *de novo* de SPA ont pour objectif d'explorer *ex-ante* une très large combinaison d'alternatives (Meynard, 2008) dans un contexte changeant. Pour l'évaluation des SPA, les modèles sont des outils indispensables pour prédire les effets à long terme de systèmes candidats, bien que leur efficacité reste encore à prouver. Au-delà de l'exploitation, l'évaluation de scénarios² a également fait l'objet de multiples développements méthodologiques dans les dernières décades (van Notten *et al.*, 2003; Börjeson *et al.*, 2006; Henseler *et al.*, 2009). La formulation des visions du futur et leur formalisation en scénarios, et parfois même leurs évaluations, avec des acteurs³, ont fait l'objet de nombreux travaux (Kok *et al.*, 2007; Patel *et al.*, 2007; Kok *et al.*, 2009). Les analyses produites sont la plupart du temps à des échelles régionale, nationale ou internationale. Le point d'entrée est souvent le développement rural, englobant des aspects plus larges que l'agriculture. Les SPA n'y sont que peu formalisés, dans leur diversité et leur fonctionnement, en particulier parce que l'échelle de l'exploitation agricole est souvent ignorée.

²La notion de « scénario » adaptée à notre problématique peut se définir comme une vision formalisée du futur, intégrant des changements endogènes et/ou exogènes aux systèmes de production agricoles.

³ Nous utilisons le terme « acteur » en référence aux multiples institutions présentes dans un territoire qui ont des objectifs en lien avec celui-ci. Nous l'utilisons comme synonyme du terme « porteurs d'enjeux » (en anglais, « stakeholders »).

Dans la conception/évaluation de systèmes *de novo*, peu de travaux ont été conduits pour intégrer différentes échelles (en particulier autour de celle de l'exploitation) pour explorer, à partir de scénarios, des combinaisons de SPA alternatifs et de politiques alternatives.

L'échelle du territoire⁴ est une échelle intermédiaire, entre l'exploitation et la région (au sens administratif). Le territoire est l'échelle où de nombreuses décisions de politiques locales sont prises. C'est également une échelle où les impacts agrégés des exploitations agricoles peuvent être observés (Meynard, 2008; Thieu *et al.*, 2011). Par ailleurs, les acteurs d'un territoire peuvent être facilement identifiés et éventuellement associés dans des démarches d'évaluations. L'évaluation des évolutions des SPA, jusqu'à l'échelle du territoire, hérite donc de ces deux courants de recherche (« pas-à-pas » et « *de novo* ») : l'échelle de l'exploitation reste centrale, cependant les différents objectifs des acteurs nécessitent de considérer des échelles supérieures. Ce type d'évaluation requière le développement de démarches adaptées à la combinaison de plusieurs types de système opérant à des échelles différentes.

1.2. Besoin de démarches pour l'évaluation participative, multicritères, multi-échelles, et prospective des systèmes de production agricoles

L'association d'agriculteurs et d'acteurs à l'évaluation de systèmes innovants dans un territoire trouve sa rationalité dans au moins quatre éléments :

- Dans un territoire, les acteurs sont porteurs de connaissances sur les caractéristiques biophysiques et socio-économiques de leur environnement local, qui sont pertinentes pour l'évaluation des SPA (Scoones *et al.*, 1994).
- Pour évaluer des systèmes agricoles, ils peuvent participer au choix des processus qui doivent être pris en compte, de par leur expertise sur le fonctionnement des SPA (Etienne *et al.*, 2011).
- Leurs connaissances du territoire peuvent influencer le choix des critères d'évaluation et la définition du niveau de détail nécessaire pour la quantification des indicateurs, de manière à ce qu'ils aient confiance dans ceux-ci et puissent les utiliser pour des négociations ou des décisions.
- Dans un territoire, les acteurs peuvent mettre en place les changements nécessaires à l'amélioration des performances économiques et environnementales des SPA.

⁴ Une définition appliquée d'un territoire pourrait être, selon nous, un espace cohérent en termes d'agriculture ou d'environnement biophysique, pour lequel des acteurs prennent des décisions relatives au développement socio-économique ainsi qu'à l'environnement.

De nombreuses méthodologies ont été développées et mises en œuvre pour l'association des acteurs dans les projets de recherche et développement. Le terme « recherche participative » est un terme générique qui regroupe une grande diversité de pratiques (Neef *et al.*, 2010), dont les efforts de formalisation sont croissants depuis la dernière décade (Etienne, 2010; Faure *et al.*, 2010; Voinov *et al.*, 2010).

L'évaluation participative de SPA dans un territoire et la prise en compte des différents objectifs qui sont associés aux missions des acteurs locaux impliquent d'analyser les SPA à partir de plusieurs points de vue sur le territoire et ses systèmes. Ils peuvent être traduits sous forme de critères et d'indicateurs de multiples natures (qui peuvent être qualitatifs ou quantitatifs) et couvrir différents domaines (économiques, sociaux, environnementaux, organisationnels, etc.), nécessitant l'intégration de connaissances issues de disciplines variées. Cette intégration s'appuie la plupart du temps sur des méthodes d'analyse multicritères (Sadok *et al.*, 2008).

La considération des objectifs multiples assignés aux SPA par les différents acteurs, ainsi que la prise en compte des processus de réaction des systèmes aux changements, impliquent l'intégration, dans l'analyse, de différentes échelles spatiales et temporelles (Lopez Ridaura *et al.*, 2005; Laborte *et al.*, 2007). L'échelle de l'exploitation ne peut être ignorée puisque la plupart des décisions y sont prises. Cependant, des niveaux supérieurs sont souvent plus pertinents pour l'observation de certains processus, dont les évolutions correspondent à des objectifs et intérêts de certains acteurs. Par exemple, la génération d'emploi par l'agriculture ou la valeur ajoutée de la production sont des indicateurs qui n'ont de sens qu'à l'échelle de la région. C'est également le cas, par exemple, d'indicateurs environnementaux relatifs aux impacts de l'agriculture sur la biodiversité ou sur la qualité de l'eau, qui ne se mesurent par forcément aux mêmes horizons de temps que les performances économiques d'une exploitation agricole. Les démarches d'évaluation des SPA, avec les acteurs locaux d'un territoire doivent donc être multi-échelles.

Finalement, face à la complexité des facteurs de changements (politiques, économiques, sociétaux et environnementaux), qui agissent souvent en combinaison, l'évaluation des SPA doit porter à la fois sur la situation actuelle, mais également produire des informations sur les futurs possibles pour les SPA à différentes échelles de temps. L'exploration de nouveaux systèmes de cultures ou de nouvelles activités, et leurs adéquations aux contraintes des systèmes de production actuels ainsi qu'à des visions du futur (sous forme de scénarios), doit

permettre d'assister les agriculteurs et porteurs d'enjeux d'un territoire dans leurs réflexions et décisions stratégiques (van Keulen, 2007). Les démarches d'évaluation des SPA doivent donc intégrer des éléments méthodologiques qui permettent de réaliser des évaluations prospectives (Rabbinge *et al.*, 1997; van Ittersum *et al.*, 1998; Godet, 2000) au caractère exploratoire⁵.

L'évaluation intégrée des systèmes agricoles (*Integrated Assessment of Agricultural Systems - IAAS*) a récemment émergé comme discipline, et de nombreuses contributions ont formalisé les principes de ces démarches (van Ittersum *et al.*, 2008; Castoldi *et al.*, 2010; Sattler *et al.*, 2010; Bezlepikina *et al.*, 2011). Dans ce contexte, plusieurs travaux scientifiques ont contribué au développement de démarches pour réaliser des étapes circonscrites ou des tâches particulières dans la démarche globale qui consiste à évaluer ex-ante les SPA à différentes échelles.

De nombreux projets de recherche se sont efforcés de décrire conjointement les processus biophysiques en jeu dans les SPA et les processus décisionnels des agriculteurs. La compréhension de ces processus est déterminante pour évaluer les impacts de nouvelles modalités de décision (Le Gal *et al.*, 2010). Lopez Ridaura *et al.*, (2002; 2005) et Bouma J. (2002) entre autres, ont présenté des fondements théoriques et des stratégies pour sélectionner des critères et indicateurs pertinents qui puissent représenter les enjeux et objectifs de différents types d'acteurs intervenant à différentes échelles et ce par rapport à la durabilité de systèmes agricoles candidats. La manière de renseigner ces critères pour la quantification des indicateurs, qu'ils soient économiques, environnementaux ou sociaux, a été aussi l'objet de nombreux travaux (Bell *et al.*, 1999; van der Werf *et al.*, 2002). Très souvent, les indicateurs sont évalués sur une base quantitative via l'utilisation de modèles mathématiques à caractères déterministes ; cependant, dans les approches plus participatives, des données davantage qualitatives issues de l'expertise des acteurs impliqués ont pu être utilisées.

Lopez Ridaura *et al.* (2005), Laborte (2006) et Diaz-Balteiro et Romero (2004), entre autres, ont développé des techniques d'agrégation et d'intégration d'indicateurs pour une analyse multicritères et multi-échelles. Enfin, des démarches participatives, en partenariat, avec éventuellement la mise en place de plateformes multi-acteurs permanentes, ont été imaginées et testées pour le diagnostic des systèmes actuels et innovants et la co-construction et l'évaluation de scénarios (Giampietro, 2003; Kok *et al.*, 2007; Etienne, 2010).

⁵ Nous entendons par exploratoire des scénarios qui ne visent pas à prédire l'avenir mais plutôt à imaginer et à évaluer des futurs possibles.

Malgré cette diversité d'avancées méthodologiques autour de l'IAAS, il existe peu d'efforts qui visent au développement et à l'application de l'intégralité d'une démarche réunissant les caractères : prospectif, multi-échelles, multicritères et participatif.

Aucune démarche, à notre connaissance, n'intègre les quatre caractéristiques présentées ci-dessus et la proposition de l'utilisation d'une telle démarche soulève de nouvelles questions méthodologiques pour l'évaluation des SPA :

- Quelles sont les conditions de l'engagement des acteurs d'un territoire dans une démarche d'évaluation participative des SPA ? Quels peuvent être les apports de ce type de démarche pour ces acteurs ? S'agit-il d'aide à la décision, d'aide à la réflexion stratégique ou d'aide à la négociation ?
- Quelles sont les qualités attendues des indicateurs pour l'évaluation multicritères ? En faut-il un nombre important ou réduit ? Est-il nécessaire d'agrèger ces indicateurs en indices synthétiques ? Faut-il les pondérer ? Quel est le niveau de précision nécessaire dans le calcul des indicateurs ? Quelle erreur les acteurs sont-ils prêts à accepter ? Est-il acceptable d'avoir des niveaux d'erreurs différents entre les indicateurs ? Quelles données doivent être utilisées pour réaliser ces évaluations ? Quels problèmes soulèvent le fait de combiner différentes sources de données ?
- Quelles sont les échelles pertinentes pour les différents acteurs et les indicateurs appropriés pour l'évaluation des SPA à chaque échelle ? Comment agréger les indicateurs de l'échelle de l'exploitation à l'échelle du territoire ? Peut-on intégrer dans les modèles des processus simulés à différentes échelles ?
- Quels sont les horizons de temps pertinents pour une évaluation à différentes échelles spatiales ? S'agit-il de travailler sur les transitions entre la situation actuelle et une situation future ?

Sur la base de ces questions notre étude vise à développer une démarche et des méthodes qui permettent de réaliser une évaluation participative, multicritères, multi-échelles et prospective des SPA. Pour développer une démarche, il est nécessaire de l'appliquer sur un ou des terrains bien délimités, avec des acteurs concrets, des enjeux réels, des controverses et des points de vue contrastés des différentes parties prenantes.

Le terrain choisi pour cette thèse est la Camargue, avec une attention particulière aux évolutions de l'agriculture de ce territoire dans un contexte de changement politique (réforme de la Politique Agricole Commune - PAC), et de développement de systèmes agricoles alternatifs tels que l'agriculture biologique (AB) pour répondre à des objectifs sociétaux de réduction des produits phytosanitaires.

2. La Camargue : un territoire agricole où les relations agriculture/environnement sont étroites

2.1. Quelques éléments d'histoire et de contexte socio-économique de la Camargue

La Camargue est une région située dans le sud-est de la France, aux confins du Delta du Rhône (Figure 1.1). L'unité de cette région est issue de sa géomorphologie, étant constituée de plaines alluvionnaires qui étaient régulièrement inondées par les débordements du Rhône jusqu'à son endiguement au cours du 19^{ième} siècle. La construction de digues a donc permis de stabiliser une population et des activités agricoles dans la région (Mathevet, 2004). Cependant, le déficit de pluie en comparaison de l'évapotranspiration (respectivement 600 mm et 1300 mm par an en moyenne) conduit l'eau salée des nappes phréatiques situées sous la Camargue à remonter à la surface, ce qui induit des phénomènes de salinisation des sols (Heurteaux, 1994). Avant la canalisation du Rhône, les inondations permettaient de dessaler les sols en lessivant le sel par gravité. C'est dans ce contexte que le riz et la vigne ont été introduits en Camargue, ces cultures étant respectivement inondées en été et en hiver, ce qui permettait de dessaler les sols et de les maintenir propres à la culture (Mathevet, 2004). Les volumes d'eau importants nécessaires à cette désalinisation (actuellement, il est considéré qu'un hectare de riz reçoit environ 25 000 m³.ha⁻¹ (Chauvelon, Com. Pers.⁶)) doivent néanmoins être pompés dans le Rhône et acheminés jusqu'aux parcelles via des canaux d'irrigation. En plus de cette nécessité d'irriguer se pose le problème de l'assainissement des terres. En effet, certains sols, en particulier à faible altitude, sont sujets à des phénomènes d'hydromorphie liés à des problèmes d'écoulement de l'eau. Il est donc nécessaire d'assécher ces terres au début du printemps et à l'automne où un certain nombre d'opérations culturales sont à réaliser. Des canaux d'irrigation ont été construits en parallèle de canaux d'assainissement ou de drainage (Rivière-Honegger, 1989). Ces derniers collectent les surplus d'eau et les évacuent soit vers le Rhône via un re-pompement (cas de plus de 19 périmètres d'assainissement, gérés par des Association Syndicale Autorisée - ASA), soit de manière

⁶ Communication personnelle

gravitaire vers les étangs centraux de la Camargue (cas de deux bassins d'assainissement, gérés par les ASA de Roquemaure et de Fumemorte).

Aujourd'hui, la Camargue est considérée comme une zone humide d'intérêt majeur pour la faune et la flore qui y vivent. La Réserve Nationale de Camargue⁷ (réserve intégrale, sans activité humaine) a été créée en 1927 et couvre le lac du Vaccarès. Le Parc Naturel Régional de Camargue a été créé en 1970, et englobe aujourd'hui la majorité du territoire camarguais situé dans les Bouches du Rhône. La Tour du Valat est un centre de recherche sur les milieux humides méditerranéens, qui gère plus de 2 000 ha d'espaces naturels. Plusieurs propriétés ont été rachetées par les départements du Gard et des Bouches du Rhône pour créer des domaines Départementaux de l'Environnement. La Camargue Gardoise, à l'ouest du territoire, est en partie classée en zone Natura 2000, la Grande Camargue étant en cours de certification. Les espaces naturels représentent plus du tiers de la surface du territoire, et une grande diversité de milieux est présente : des étangs et lagunes (par exemple celles du Vaccarès), des marais, des espaces prairiaux secs, des sansouires (prairies salées, avec une végétation allomorphique) (Mathevet, 2004; Picon, 2008).

L'ensemble de ces milieux, plus ou moins anthropiques, à vocation de protection et de gestion de la faune et flore locales, a créé une image d'espaces naturels et de nature sauvage qui donne aujourd'hui à la Camargue sa renommée internationale et participe beaucoup à l'attractivité touristique du territoire. Le tourisme est la première activité économique du territoire, suivi par l'agriculture et les activités d'élevages, décrits dans la partie suivante (Calvet et al., 2011). Près de 20 000 ha sont aujourd'hui dévolus à la production de sel, sur deux localités (Aigues Mortes en Camargue Gardoise et les salins de Giraud en Grande Camargue) (Figure 1.2).

⁷ <http://www.reserve-camargue.org/>

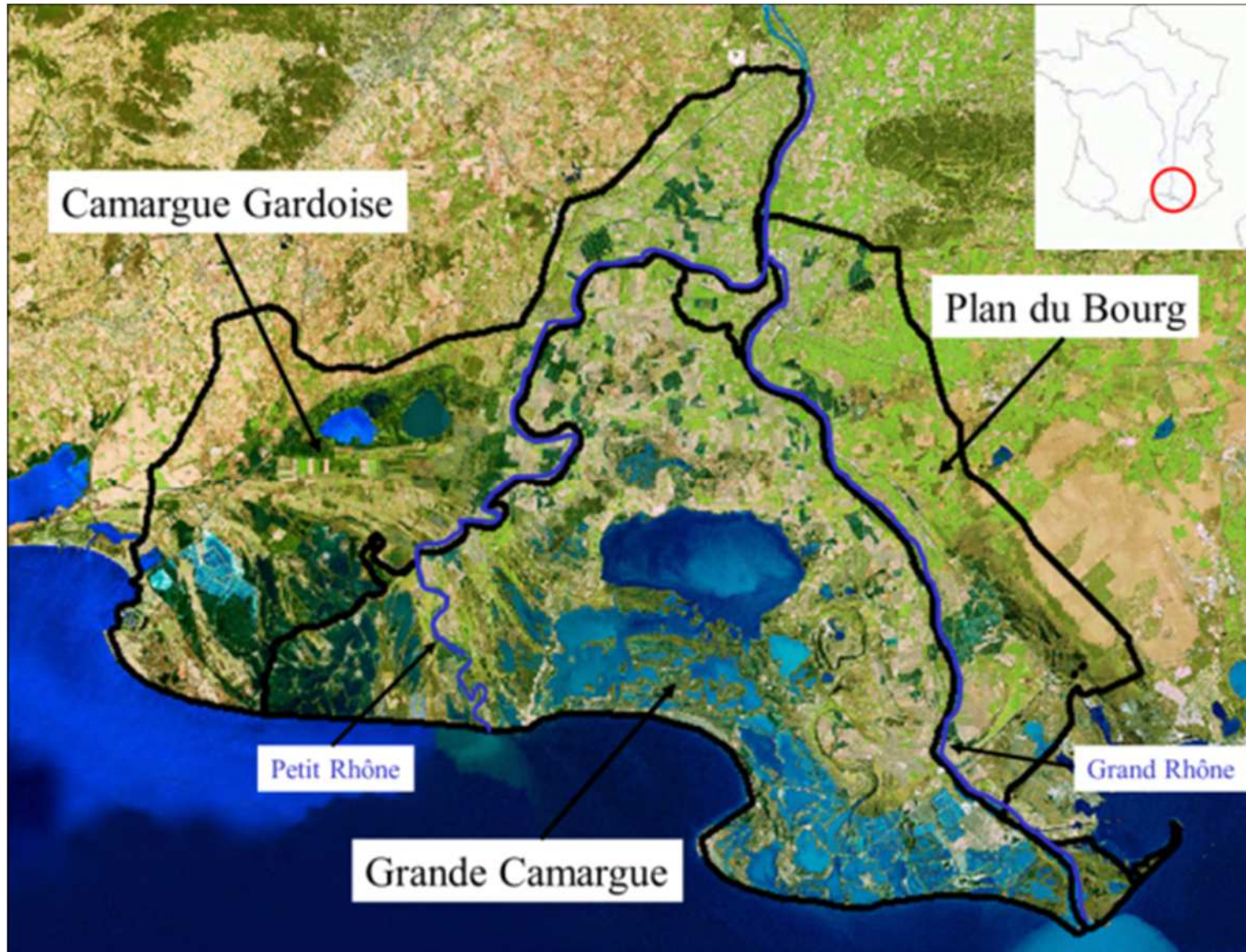


Figure 1.1 : Carte du territoire camarguais.

Sont distinguées les trois sous-régions, délimitées par les deux bras du Rhône. Ce périmètre correspond aux limites de la Réserve de Biosphère, programme Man And Biosphere, UNESCO (données et image satellite : Parc Naturel Régional de Camargue, 2010, Syndicat Mixte de Gestion de la Camargue Gardoise, 2010, mise en forme des données : Bertrand Chaussat, 2010).



Figure 1.2 : Photos de la Camargue.

De gauche à droite et haut à bas : Rizières vue du ciel, Marais du Vigueirat vue du ciel, Bord de l'étang de Vaccarès, Bottes de roseaux récoltés, tâche de sel dans une prairie, Tas de sel au salin d'Aigues Mortes (Crédits photos : J.-C. Mouret et le Marais du Vigueirat).

2.1. Les systèmes agricoles camarguais

Le développement de l'agriculture en Camargue a été possible avec l'endiguement du Rhône. Depuis la Camargue a été cultivée avec différentes cultures dont la vigne. Après la crise du phylloxera à la fin du 19^{ème} siècle, la culture de la vigne s'est développée fortement du fait de la possibilité de l'irriguer, le vecteur du phylloxera, un nématode, ne résistant pas à l'inondation hivernale des sols. Quand la solution au phylloxera a été trouvée (greffage sur des porte-greffes résistants), le secteur viticole camarguais a connu une crise sans précédent et la vigne a été arrachée au profit de la culture du riz, seule culture inondée permettant de maintenir le sel en dessous de la zone racinaire des cultures. De fait, la Camargue est la seule région (exception de quelques centaines d'hectares dans l'Aude) de France continentale où le riz est cultivé. La culture du riz, et les infrastructures qui y sont liées se sont donc développées progressivement, pour atteindre dans les années 1970 plus de 30 000 ha de riz. Néanmoins, un contexte économique défavorable dans les années 1980 a entraîné la chute des surfaces en riz (jusqu'à moins de 5000 ha) en Camargue (Figure 1.3).

Des remontées fréquentes de sel sont alors apparues et les acteurs parlent encore de cette période comme d'une période de « désertification » : chute des rendements des autres cultures, friches agricoles, problèmes économiques dans les exploitations. Parallèlement, le niveau de l'étang du Vaccarès a diminué et sa concentration en sel a augmenté, du fait de la réduction des volumes d'eau de drainage des parcelles rizicoles. Face à cette crise, le gouvernement a lancé un « plan de relance de la riziculture » qui s'est traduit par la création du Centre Français du Riz, des aides pour la remise en état des infrastructures et des incitations à l'amélioration des pratiques (gestion de l'eau, fertilisation et protection phytosanitaire). Cette période reste donc dans la mémoire collective comme une situation qu'il ne faut pas reproduire.

Depuis, grâce au plan de relance et à l'amélioration des pratiques, la production a repris et entre 15 000 ha et 20 000 ha de riz sont cultivées chaque année (Figure 1.3). Aujourd'hui, la production camarguaise représente près du tiers de la consommation nationale de riz.

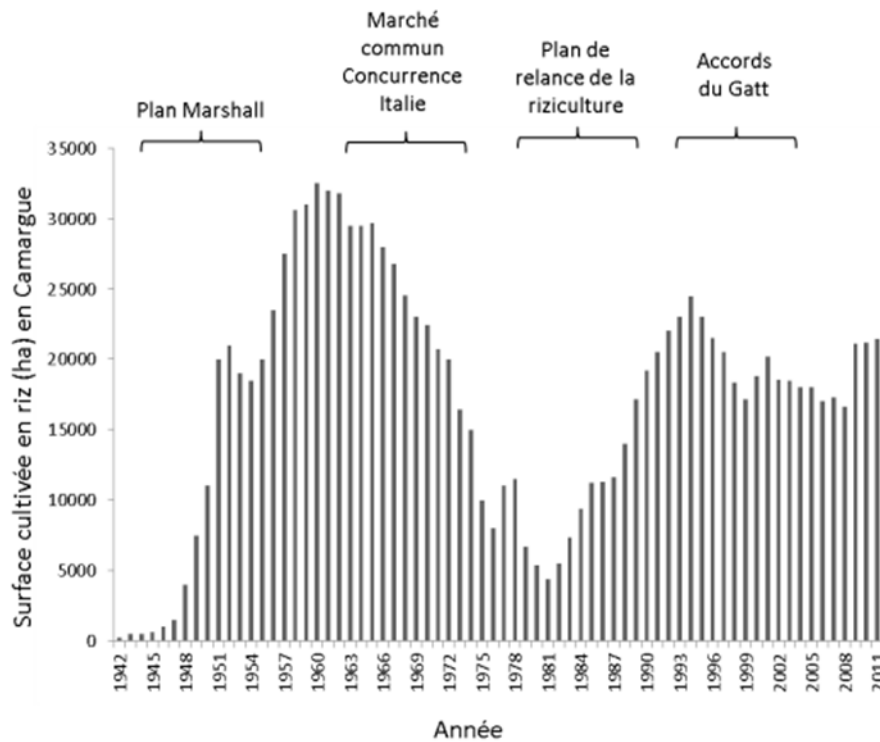


Figure 1.3 : Evolution des surfaces en riz en Camargue, en fonction des différents changements de contexte national et international, d’après Mouret (2010).

Le riz joue également un rôle, en dehors de la désalinisation des sols, quand il est cultivé en rotation avec d’autres cultures, en cassant les cycles de développement des adventives des cultures sèches. En effet, la seconde culture en termes de surface est le blé-dur (environ 10 000 ha), qui vient souvent après le riz dans la rotation. La luzerne et les prairies sont également présentes pour l’alimentation des bovins et ovins. D’autres espèces sont aussi cultivées sur de plus petites surfaces telles que le tournesol, le colza, le sorgho, le maïs, les pois et les lentilles.

L’élevage traditionnel camarguais est présent dans plus d’une trentaine d’exploitations (Hérault, 2010), qui utilisent de grandes surfaces, notamment de marais et friches. Deux races principales sont élevées : la race locale dite « Biou » pour la course camarguaise (jeu taurin traditionnel) ainsi que pour la production de viande (labélisée Appellation d’Origine Contrôlée Taureau de Camargue) et une race de taureaux de combat espagnol pour la corrida. L’élevage des bovins est souvent accompagné de l’élevage de chevaux camarguais, qui sont utilisés pour la conduite des troupeaux bovins (qui sont assez « sauvages », élevés sur de grandes surfaces). L’élevage ovin a beaucoup diminué, entre 10 à 15 troupeaux pâturent encore en Camargue pendant la saison hivernale.

Enfin, les cultures pérennes comme la vigne et les vergers, ainsi que le maraichage de plein champ (pommes de terre et tomates), sont des activités importantes dans certaines parties du territoire, notamment sur les terres sableuses de la Camargue Gardoise avec l'appellation des vins des sables. Toutes ces activités sont présentes sous forme de mosaïque au sein du territoire comme en témoigne la figure 1.4 qui représente l'occupation du sol en Camargue en 2006. La figure 1.5 illustre notamment les différents stades de cultures du riz, et les infrastructures et matériels utilisés pour sa production.

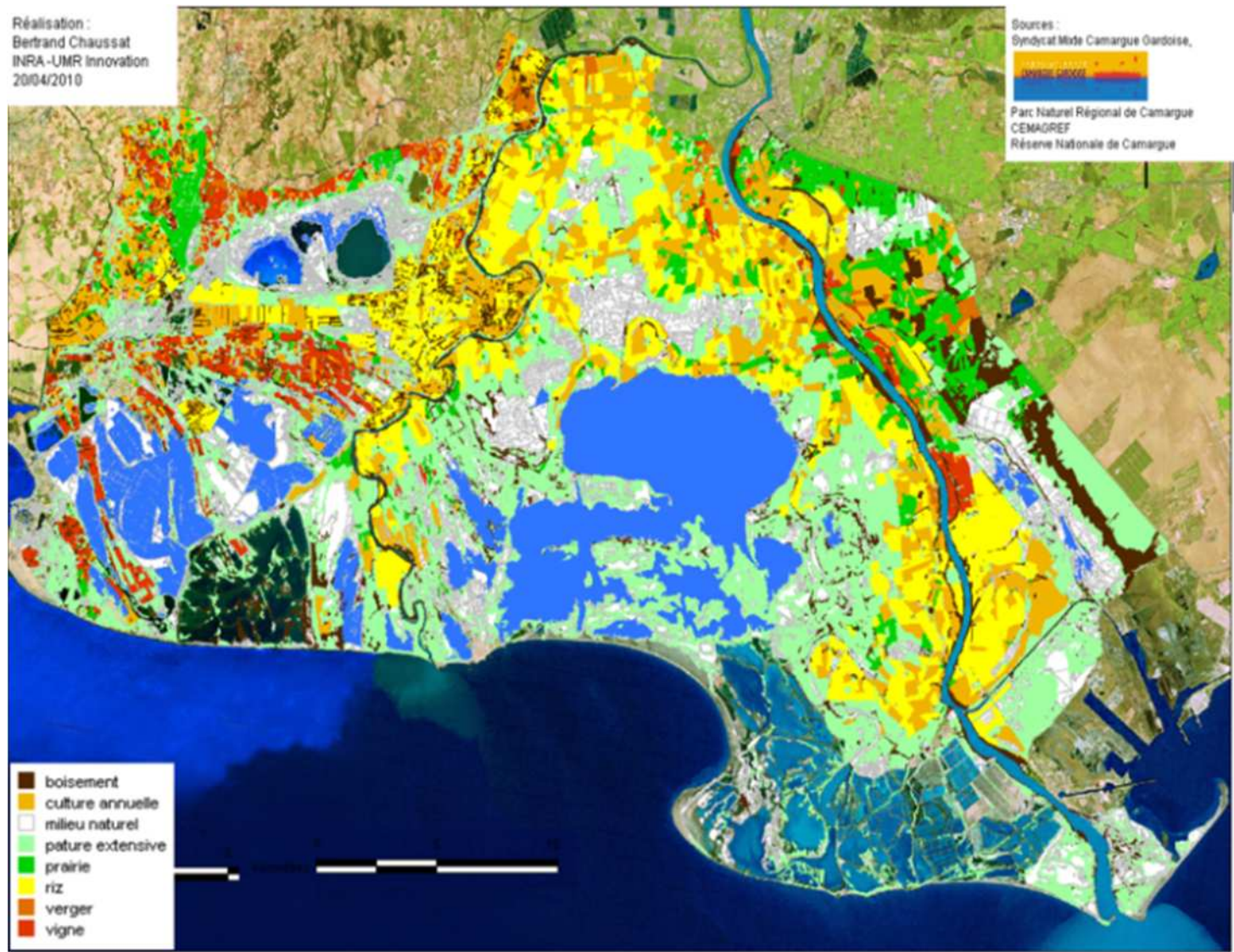


Figure 1.4 : Occupation du sol en 2006 en Camargue.

(Données du Syndicat Mixte de la Camargue Gardoise, du CEMAGREF, du Parc Naturel Régional de Camargue, et de la Réserve Nationale de Camargue. Mise en forme des données : Bertrand Chaussat, UMR Innovation, 2010)



Figure 1.5 : Photos de Camargue.

De Gauche à droite et haut à bas : Canaux d'irrigations, préparation du sol avant semis du riz, mise en eau, traitement à l'hélicoptère, levée du riz, riz au stade remplissage du grain, moisson, taureaux de Camargue, chevaux de Camargue (Crédits photos : J.-C. Mouret).

2.2. Enjeux actuels de l'agriculture et de l'environnement en Camargue.

Les enjeux liés aux relations entre l'agriculture et l'environnement sont de plus en plus mis en avant par la société. La Camargue, à son échelle, n'échappe pas à cette tendance, avec à la fois une demande croissante du tourisme vert et des milieux naturalistes pour une amélioration des pratiques agricoles en terme environnemental.

Les enjeux de l'agriculture peuvent se décliner à différentes échelles : enjeux techniques liés aux cultures, enjeux économiques des exploitations agricoles et des filières et enjeux environnementaux et socio-économiques du territoire.

L'environnement camarguais fait l'objet de multiples études, à la fois sur des espèces précises, mais également sur les liens entre l'agriculture et l'environnement (Mathevet *et al.*, 2003; Jaeck *et al.*, 2009). En particulier, les aspects liés à la gestion de l'eau, en terme quantitatif comme qualitatif, sont régulièrement soulevés au conseil scientifique de la réserve de Biosphère, et portés par les acteurs de la gestion et protection du territoire. La riziculture utilise beaucoup d'eau, qui nécessite d'être en partie évacuée du territoire. Une partie de cette eau s'écoule par gravité dans le lagon du Vaccarés, ce qui pose des problèmes à la fois de quantité (trop d'eau) (Chauvelon, 1998; Chauvelon *et al.*, 2005), de rythme (période de l'année à laquelle l'eau s'écoule, qui est inverse aux cycles naturels) et de qualité. Plusieurs études conduites ces dix dernières années sur les résidus de pesticides dans ces eaux de drainage, ont montré le potentiel de lessivage de ces produits et l'accumulation des résidus dans les espaces naturelles (Roche *et al.*, 2000; Comoretto *et al.*, 2007; Comoretto *et al.*, 2008). Dans ce contexte, le sujet est sensible en Camargue, et d'actualité avec le plan EcoPhyto 2018 issu du Grenelle de l'Environnement, qui vise à réduire de moitié l'usage des produits phytosanitaires.

La culture du riz, étant la culture principale en Camargue, mais étant minoritaire à l'échelle du pays, fait l'objet d'une réduction du nombre de molécules utilisables, et les agriculteurs ont des difficultés à gérer les mauvaises herbes avec ces produits. De nouvelles variétés sont également recherchées pour améliorer les résistances aux champignons ou pour leur adaptation au semis à sec, une technique qui permet d'économiser de l'eau en semant le riz comme du blé dur, et en retardant ainsi la mise en eau de la rizière. L'AB est un autre enjeu, puisque son développement est important en Camargue, et qu'il est aujourd'hui limité par des contraintes agronomiques telles que la gestion des mauvaises herbes. Enfin de nouveaux systèmes se développent, tels que la culture de tomate de plein champ, qui inquiètent à la fois

les agriculteurs et les gestionnaires du territoire quant à leurs impacts sur l'agriculture (changement de systèmes) et l'environnement (pollution).

L'environnement économique des marchés internationaux et la volatilité des prix des productions agricoles, ainsi que la réforme de la PAC inquiètent les exploitants agricoles. La recherche d'autonomie par rapport à ces deux facteurs de rentabilité des exploitations semble être une stratégie favorisée par les exploitants (Mouret et al., 2011). De nombreux investissements ont été réalisés dans les dernières années dans la filière de transformation locale du riz, et ces entreprises craignent aujourd'hui pour l'avenir de leur filière du fait de ce contexte de réforme et d'incertitude des marchés, mais également de la concurrence des autres pays producteurs de riz, qui produisent à un coût moindre.

2.3. Continuité des actions de recherche en Camargue dans laquelle s'inscrit ce projet de thèse

La recherche et le développement ont produit et produisent de très nombreuses études sur le territoire camarguais. En particulier, le CNRS, la Tour du Valat, l'INRA et le CIRAD ont beaucoup investi ce terrain depuis les années 1970. C'est donc un territoire pour lequel les connaissances et données disponibles sont particulièrement importantes.

Depuis le début des années 1980, l'INRA s'est engagé, notamment à travers le LECSA (Laboratoire d'Etude Comparée des Systèmes Agricoles), dans des recherches agronomiques, économiques et sociologiques sur le terrain camarguais. Les recherches ont notamment porté sur les systèmes de culture (Barbier et al., 1986; Mouret, 1988), sur l'organisation du travail dans les exploitations agricoles (Barbier *et al.*, 2000), sur la filière (Pichon, 2000), sur l'élevage (Lagacherie-Valmalle, 1988) et sur l'économie des systèmes rizicoles (Mendez-del-Villar, 1987).

Plus récemment, l'effort de recherche à l'Unité Mixte de Recherche (UMR) Innovation (issu du LECSA) s'est porté sur le développement de systèmes de culture innovants utilisant peu d'intrants chimiques, et notamment sur l'AB, au travers de différents projets de gestion des mauvaises herbes, de formation d'agriculteurs à la riziculture biologique, sur la fertilisation en AB, ainsi que sur une étude prospective réalisée avec le Parc Naturel Régional de Camargue (PNRC) sur la gestion des pailles de riz (Monier et al., 2009).

Dans ce contexte de recherche, il est donc apparu opportun d'utiliser la Camargue pour développer et appliquer une démarche d'évaluation participative, multicritères, multi-échelles et prospective des SPA.

Au-delà des questions méthodologiques développées dans la section 1 de cette introduction, l'évolution de l'agriculture en Camargue soulève les questionnements suivants auxquels nous tentons de contribuer :

- À l'échelle de la parcelle, quels systèmes alternatifs pourraient répondre aux enjeux environnementaux et économiques de l'agriculture camarguaise ? Quels sont leurs performances et impacts, et quelles difficultés soulèvent leur insertion dans les systèmes actuels ?
- À l'échelle de l'exploitation, quels systèmes de production pourraient contribuer à améliorer la durabilité des exploitations agricoles ? Quelles sont les adaptations possibles des exploitations face à des changements de contexte économique et réglementaire ?
- À l'échelle du territoire camarguais, quelles combinaisons de systèmes de culture, de systèmes d'exploitation, et de contexte économique et réglementaire pourraient simultanément réduire les impacts environnementaux de l'agriculture et assurer leur rentabilité ? Quelles politiques locales, de type mesures agri-environnementales ou autre, pourraient contribuer à l'atteinte de ces objectifs ?

3. Objectifs et plan de la thèse

L'objectif général de cette thèse est de développer et mettre en œuvre une démarche d'évaluation intégrée des systèmes agricoles (IAAS) en Camargue avec les acteurs du territoire, à travers le développement de scénarios exploratoires et leur quantification via des indicateurs, à différentes échelles.

Pour l'évaluation participative, multicritères, multi-échelles et prospective, nos objectifs particuliers sont :

- De proposer et mettre en œuvre une démarche d'évaluation des systèmes agricoles en association avec des acteurs camarguais.
- D'intégrer des démarches d'évaluation multicritères pour évaluer les systèmes de production agricoles : identifier et calculer des indicateurs pertinents pour les acteurs, de

différents domaines de la durabilité ; et à l'aide de connaissances issues de disciplines variées, formaliser les compromis possibles entre de multiples indicateurs correspondant aux objectifs des acteurs.

- De calculer et agréger ces indicateurs à de multiples échelles, préalablement identifiées et caractérisées par rapport aux leviers d'actions des acteurs.
- De quantifier ces indicateurs pour des scénarios d'évolution des SPA, pour pouvoir comparer des futurs possibles et proposer des scénarios « compromis » entre les différents objectifs des acteurs ; et d'identifier les horizons de temps pertinents pour les acteurs travaillant à de multiples échelles spatiales.

L'objectif général peut également être décliné en objectifs appliqués au terrain camarguais :

- Identifier des systèmes techniques alternatifs qui puissent satisfaire les objectifs des exploitants et répondre aux enjeux environnementaux et économiques de l'agriculture en Camargue.
- Identifier des mesures de politiques locales qui puissent contribuer au développement de l'agriculture et satisfaire les objectifs environnementaux assignés au territoire camarguais.
- Identifier quelles mesures politiques locales peuvent être en adéquation avec des systèmes agricoles alternatifs, et quelles seraient les conséquences de leur développement à l'échelle du territoire.
- Identifier comment les évolutions économiques et de politiques, nationales et européennes, pourraient impacter les systèmes agricoles camarguais, et comment ceux-ci pourraient s'adapter.

La première étape de ce travail de thèse a consisté à analyser, parmi les démarches existantes d'évaluation de scénarios relatifs aux SPA, lesquelles peuvent contribuer à l'évaluation participative, multicritères, multi-échelles et prospective de systèmes agricoles. Leurs avantages, inconvénients et possibles complémentarités pour ce type de démarche ont été mis en évidence et sont rapportés dans le chapitre 2. Celui-ci conclut sur une proposition de démarche innovante par sa combinaison des différentes approches de modélisation des SPA dans un cadre participatif.

Suite à cette analyse, cette démarche a été mise en œuvre. Elle peut être synthétisée en cinq phases (Figure 1.6), dont le contenu est rapporté dans les différents chapitres de la thèse. Cette

formalisation de la démarche s'inspire des travaux de van Ittersum et al. (1998) et de Lopez-Ridaura et al. (2002; 2005).

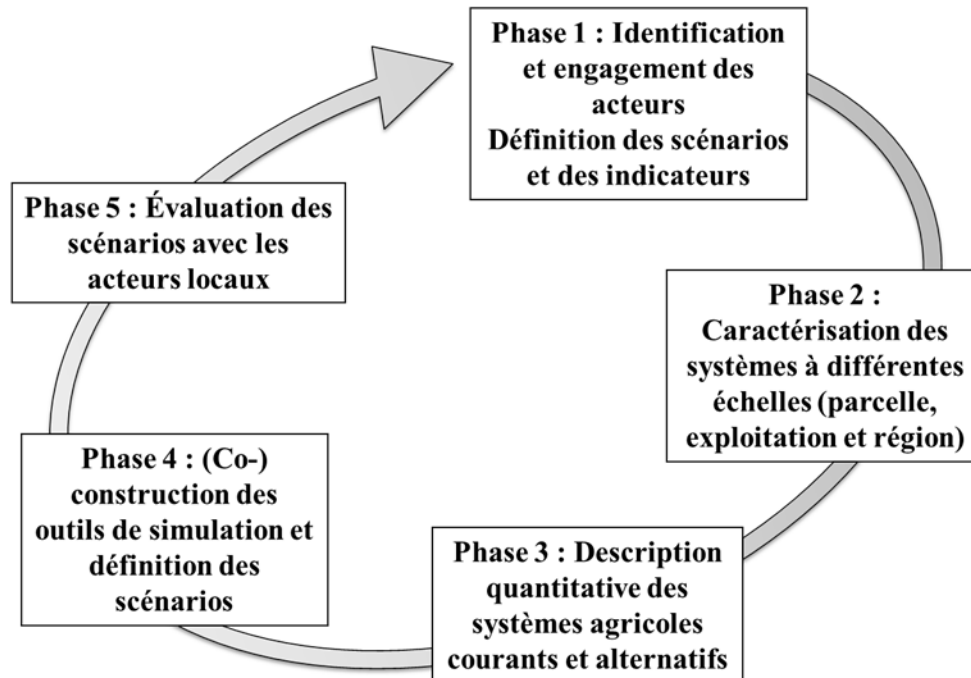


Figure 1.6 : Enchaînement des quatre phases de la démarche mise en œuvre en Camargue pour l'évaluation des scénarios.

Même si les phases se succèdent, de nombreux aller-retour sont nécessaires entre les différentes phases, le développement d'une phase questionnant souvent les hypothèses réalisées à la phase précédente.

La première phase consiste en l'identification et l'engagement des acteurs, la formalisation des échelles d'analyse et des scénarios, et la définition des indicateurs pour l'évaluation. Le souhait de travailler avec les acteurs nécessite l'identification précise de ceux qu'il est nécessaire d'associer, leur engagement progressif dans le projet et surtout la construction d'une relation de confiance mutuelle. L'objectif du chapitre 3 est de présenter la méthodologie mise en œuvre en Camargue pour identifier les acteurs, les associer à la démarche, transcrire leurs objectifs et contraintes en indicateurs d'évaluation et formaliser des premiers éléments de construction des scénarios (indicateurs, systèmes agricoles alternatifs, changements de contexte économique ou réglementaire).

Évaluer des scénarios depuis l'échelle de l'exploitation jusqu'à l'échelle de la région requière une connaissance importante, et si possible formalisée de manière quantitative, des systèmes

agricoles du territoire, aux échelles de la parcelle, de l'exploitation et du territoire (**Phase 2**). Le chapitre 4 porte sur cette description/caractérisation des systèmes d'exploitation agricoles camarguais.

La troisième phase consiste en la description des systèmes agricoles actuels et alternatifs, de manière quantitative. Le chapitre 5 porte sur la description des systèmes de culture céréalières camarguais et sur l'évaluation de leurs performances à l'échelle de la parcelle.

Finalement, les phases 4 et 5 portent respectivement sur le développement d'outils de simulation, sur la définition des scénarios, et sur leur évaluation avec les agriculteurs et acteurs locaux du territoire. Ces deux étapes ont mobilisé plusieurs outils pour répondre à différentes questions, à différentes étapes de la réflexion sur les systèmes agricoles.

Le chapitre 6 rapporte l'usage d'un modèle de simulation interactive, développé dans une plateforme de modélisation multi-agents, avec des agriculteurs pour évaluer des adaptations possibles des exploitations agricoles camarguaises à la réforme de la PAC de 2012 et 2014.

Ce travail sur la réforme de la PAC a été poursuivi, et d'autres scénarios ont été analysés sur le thème de la réduction des impacts environnementaux de l'agriculture en utilisant un modèle bioéconomique à objectifs multiples avec certains acteurs locaux du territoire. Ce travail est rapporté dans le chapitre 7.

Enfin, le dernier chapitre propose des éléments de discussion sur les travaux réalisés en Camargue au cours de cette thèse, puis sur les avancées réalisées pour l'évaluation participative, multicritères, multi-échelles et prospective des systèmes de production agricole. Les apprentissages de ce travail pour le territoire camarguais sont également discutés, et finalement des perspectives sont proposées pour la poursuite de ce travail.

Le Temps de la Réflexion...



Chapitre 2 : Evaluation intégrée et participative de systèmes agricoles aux échelles de l'exploitation et de la région

Pour la mise en œuvre d'une évaluation participative, multi-échelles et multicritères de scénarios d'évolution des systèmes agricoles en Camargue, l'usage d'outils de modélisation pourrait permettre la quantification des indicateurs. Ce chapitre, rédigé sous la forme d'un article scientifique, rapporte une analyse bibliographique qui a été réalisée dans le but d'identifier et de choisir une ou des méthodes de modélisation pour construire et évaluer des scénarios. Ces méthodes pourront être mobilisées pour le développement d'une démarche en Camargue.

Participatory integrated assessment of agricultural systems from farm to regional level⁸

Delmotte, S.¹, Lopez-Ridaura, S.¹, Barbier J.M.¹, Wery, J.²

¹ INRA, UMR Innovation 951, 2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier Cedex 2

² SupAgro Montpellier, UMR System, 2 place Pierre Viala, 34060 Montpellier Cedex 2

Abstract

Evaluating scenarios for alternative agricultural systems, such as the extension of organic or integrated cropping systems in an agricultural region, requires the use of tools that allow a Participative, Integrated, Multi-scale and Prospective Assessment of Agricultural Systems (PIMPAAS). In this paper, we reviewed the use of three approaches e.g. Bio-Economic Modeling (BEM), Agent-Based Models (ABM) and Land-Use/Land Cover Change (LUCC) models for PIMPAAS. After a presentation of the three approaches, we analyzed their advantages and drawbacks, as well as their possible complementarities. LUCC is a suitable tool for multi-scale analysis of past change and can give detailed entry point for prospective studies. BEM and MAS appeared to be suitable tools for quantifying indicators at different scales and are able to incorporate the three sustainability domains. Their ways of up-scaling are complementary: BEM seems efficient for up-scaling from field to farm and field to region, whereas ABM allow up-scaling from farm to region. ABM is well adapted to a participative assessment, while the use of BEM in a participative manner needs to be embedded in an advanced participation process. Using the results of this analysis, we recommend using a combination of LUCC, ABM and BEM in a global framework targeted to PIMPAAS analysis.

⁸ Delmotte, S., Lopez-Ridaura, S., Barbier, J.M, Wery, J.. Participatory integrated assessment of agricultural systems from farm to regional level. Submitted to the *Journal of Environmental management*.

1. Introduction

1.1. Agricultural systems assessment at different scales

In several European regions, agriculture is a key component of the social and economic dynamics. However its environmental externalities are often at the origin of critics made on the current cropping or livestock production systems (Lichtfouse et al., 2009). Alternative agricultural systems with less impact on the environment are extending in response to the societal request and consumers' new expectations. Organic Agriculture (OA), as one form of alternative system, has seen an important increase in the last decades. In 2009, it was practiced in over 3.5 million hectares in the EU25 representing 5.1% of the total agricultural area. In some countries like Austria, Switzerland, Sweden, Estonia and the Check Republic, organic farming occupied more than 10 % of the agricultural area and in other countries like Spain, Greece and Portugal the surface on organic agriculture has tripled in the last ten years (Eurostat, 2009⁹).

Up to now, such type of alternative agriculture is only found in very specific niches and only adopted in specific farm types. Therefore the economic, social and environmental impacts of such alternatives compared to the impacts of the whole agricultural sector are likely to be low. However, as these alternative agricultural systems are rapidly expanding, it becomes necessary to be able to assess the plausible impacts of such extension.

For decades, strong emphasis has been given in agronomic research to the quantification of performance and impacts of agricultural systems at field level (Doré et al., 1997). This level is relevant to investigate the relationships between plant stands, crop management techniques, soil and climate and the consequences upon agronomic and environmental performances. Up-scaling to farm level is necessary as it is the level at which decisions and interactions between crop, livestock and other component of the system can be analyzed. These two levels remain central for assessing alternatives agricultural systems but an important methodological challenge consists on the up-scaling of this assessment to the territory or regional level (Lopez Ridaura, 2005a; van Ittersum *et al.*, 2007). As the multifunctional aspects of agriculture are being recognized and impacts of agricultural systems considered in a more integrated manner, it becomes necessary to assess agricultural systems at higher scales (Rossing et al., 2007; Renting et al., 2009).

⁹ <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/eurostat/home/>

Nowadays, research efforts are targeted to the evaluation of the consequences on different indicators of sustainability of either (i) technological and/or organizational changes of agricultural systems or (ii) new policy instruments such as regulations and incentives. The first type of study often aims at identifying technical solutions that would decrease the negative impacts, and/or would improve the coexistence of different systems in a territory. For example, Cumming and Spiesman (2006), working on integrated pest management, argued that it is necessary to have regional approaches for studying the links between agriculture and nature conservation; Angevin et al. (2008) investigated the coexistence of genetically modified (GM) crops with non-GM crops. Gosme et al. (2010) did the same for intensive and low input systems such as organic farming.

The second type of regional studies of farming systems is focused on the assessment of potential impacts of new policy (van Ittersum et al., 2008; Piorr et al., 2009). In fact, at the regional and national levels, there are some clear incentives to develop agro-ecosystems with low environmental externalities, such as for example the so-called “Contrat Agriculture Durable” in France and agri-environmental measures at the European level (Anonymous, 2005). However these policies are sometimes conflicting with farmer’s strategies and constraints; moreover the final beneficiaries are rarely associated in the definition of these policies.

Therefore there is a need to bridge the gap between alternative agricultural systems development at field and farm level and policies’ definition at regional or national levels. Scenario assessment has been recently used as a methodological basis to tackle the issues of multiple scales in the assessment of agricultural systems (Lopez Ridaura, 2005a; van Ittersum *et al.*, 2008).

A scenario is a vision of the future integrating endogenous and exogenous changes related to the agricultural systems. A scenario can be composed of a combination of different technical and organizational alternatives (e.g. strategies of companies, cooperation between farmers) and possible changes of the socio-economic (e.g. market, regulations, policies) or biophysical contexts (e.g. climate change, soil degradation) where these alternatives are implemented. Change of socio-economic contexts can be related to policies coming from national or European institutions, but can also be related to local stakeholders decisions when policy needs to be adapted locally (Therond et al., 2009). However, in such process of scenario

building and assessment concerning agricultural systems, stakeholders remain rarely associated.

1.2. Evaluating scenarios of agricultural change: The need for a Participative, Integrated, Multiscale and Prospective Assessment of Agricultural Systems (PIMPAAS)

Science about agricultural systems faced a shift of paradigm in the last decade. Advances in the management of natural resources regarding concerted actions, stakeholders' platform and interactions, had to be integrated in agricultural studies, as interdependencies between agriculture and environmental and socio-economic concerns are high. Giller *et al.* (2008) discussed the possible gains of an implication of science in societal issues, meaning that scientific knowledge change from a "neutral" position to a position where it becomes "negotiated". Different ways of accompanying stakeholders in a process of guiding the future of farming in a region have been proposed, and now the question is to identify, among the plethora of tools and methods developed by sciences, how to enhance the contribution to societal problem solving (Sterk *et al.*, 2011).

Integrated assessment, as one of these approaches, has been the target of research for several projects (e.g. SENSOR (Helming *et al.*, 2008) and SEAMLESS (van Ittersum *et al.*, 2008)).

Many studies on integrated assessment have developed tools in a participative manner (Salter *et al.*, 2010; Vayssières *et al.*, 2011) for either exploring long term futures (methods for participatory developments of scenarios (Kok *et al.*, 2007)) or decision support in the short term (Jakku *et al.*, 2010). However, this kind of studies in agricultural science remains often limited to the farm level and, if a higher level is tackled, it remains done without local stakeholders' involvement (Bezlepkina *et al.*, 2011).

Considering the state of the art in methodological development for the evaluation of scenarios of agricultural changes, we have identified four features that have to be articulated in a framework to allow a Participative, Integrated, Multiscale, and Prospective assessment of agricultural systems (PIMPAAS). Associating local stakeholders and farmers in scenarios assessment requires specific methodologies to enhance participation. This implies to integrate scientific and empiric knowledge and skills to work in close cooperation with stakeholders whose objectives can refer either to economy, social or environmental aspects of agriculture. This also imply to tackle multiple scales, from field to regional, and finally to reflect on tactic

and strategic objectives through the use of prospective methodologies. These terms of reference are developed in the next paragraphs.

1.2.1. Participative

Participative assessment of agricultural systems finds its rationality in the fact that farmers and other stakeholders have notably empirical knowledge about their local environment and its biophysical and socio-economical characteristics that are relevant to facilitate the investigation. Also, their participation helps in choosing the processes to be incorporated in the analysis. Participative methodologies allow to understand this diversity of interests and objectives to identify possible conflicts as well as to make out the most of empirical knowledge about the local context including social constraints (Scoones *et al.*, 1994). Social learning and negotiation process can be improved by the use of evaluation tools which make individual knowledge more transparent (Sterk *et al.*, 2009). Van Paassen (2007) reported that a key for success in the implementation of such evaluation process is to be in close cooperation with the stakeholders through a framework for discussion and negotiation. Engaging stakeholders and farmers in a work of scenario building and evaluation requires that they find interests in the results.

1.2.2. Integrated

Apart from production, different objectives are being assigned to agricultural systems (e.g. resource conservation, landscape preservation, employment generation, water quality protection). Then, the assessment of agricultural systems must then take into account these multiple functions, by quantifying and integrating different indicators related to the economic, social and environmental performances of agricultural systems. Calculating several indicators requires methodologies that allow multicriteria analysis as well as the integration of knowledge from different disciplines such as economy, agronomy, ecology and social sciences. In fact, integrated assessment has recently emerged as a specific field in agronomic research (van Ittersum *et al.*, 2008; Castoldi *et al.*, 2010; Sattler *et al.*, 2010; Bezlepkina *et al.*, 2011).

1.2.3. Multi-scale

To evaluate the impacts of the possible extension of alternative agricultural systems in a territory, a multi-scale evaluation is required. The different stakeholders in a given region, operating at different levels, are concerned by changes in agricultural systems e.g. farmers, cooperatives, input suppliers, nature conservation associations and local extension officers.

Each of these stakeholders has its own set of indicators to assess the performance of agricultural systems which are relevant at a specific scale (Lopez Ridaura et al., 2005; Laborte et al., 2007). For example, in economic terms, the impact of current and alternative agricultural activities might be assessed with indicators at farm level (e.g. family income, returns to labor) but also with indicators relevant to higher levels e.g. economic value of total agricultural production, total direct and indirect employment generation. Moreover, indicators related to the environmental impact of the transformation of agricultural systems, might be only relevant and computable at regional levels such as biodiversity or groundwater pollution.

1.2.4. Prospective

Facing complex issues such as market uncertainty, climate change and new policies, the agricultural professionals need to think about the future to take their tactic and strategic decisions. Prospective studies have been developed for decades through the use of scenario analysis as a way to formalize possible changes and evaluate their impacts (Godet, 2000). Applied to agriculture, these changes can be of two different natures: change of context (such as market, policies, and climate) or modification of the agricultural activities (such as change of objective, reduction of input use, adoption of innovations). Evaluating technical changes in farming practices refer to ex-ante analysis (Sadok et al., 2008; Le Gal et al., 2010). Most often, data is lacking for evaluating alternative systems not yet implemented and it usually requires modeling the systems using different types of knowledge, e.g. empirical or mechanistic. Taking into account some changes of context (e.g price change, new regulation, climate) often refers to scenarios building and analysis, and to the choice of a time horizon for the research: tactic decision imply short term changes (1 to 3 years, (van Keulen, 2007)) while strategic thinking often addresses larger changes at a larger time horizon (decades). To study the adequacy of alternative techniques to sustain agricultural systems in a region in a changing context requires therefore bridging the gap between these two time horizons.

These PIMPAAS criteria provide the terms of reference for a methodology of scenario assessment of agricultural systems. The objectives of this paper are (i) to present a methodological review of different approaches regarding the PIMPAAS criteria; three existing approaches are described (i.e. Land Use / Land Cover Change, Bio-Economic Modeling and Agent Based Modeling), (ii) to analyze their potential contribution and limitation for a PIMPAAS analysis and (iii) to identify how they can be combined in a coherent framework.

2. Review of existing approaches for PIMPAAS

Different approaches have been applied in the past for the evaluation of alternative agricultural systems. Most of these approaches have been developed for a single scale of analysis (e.g. Bockstaller et al. (1997) at field level, Bockstaller et al. (2008) , Kerselaers et al. (2007) or Niccolucci et al. (2008) at farm level, and Leenhardt et al. (2010) at regional level. There are some examples of two-level analysis (commonly field and farm (Blazy et al., 2009b), or field and region (Dalgaard et al., 2001; Yun, 2003)).

When multiple scales are integrated, the approach often relies on a single criterion, for example food production (Chaumet *et al.*, 2009; Hubert *et al.*, 2010) or hydrology (Roger et al., 2002). Also, several approaches concentrate on a single component of the system, and do not allow the integration of the three sustainability domains (van Ittersum *et al.*, 2007).

Finally, other approaches have been developed putting most of the effort on one process or product, taking a very large definition of the system (for example Life Cycle Analysis, Payraudeau and van der Werf (2005)).

All such approaches show limitations for a PIMPAAS. But specific approaches have been developed in the last decade that can contribute to evaluate scenarios on the impact of the extension of alternatives farming systems at different scales. Among these, we distinguish: (i) approaches based on *Land Use / Land Cover Change (LUCC) analysis*, (ii) approaches based on *Bio-Economic Modeling (BEM)*, and (iii) approaches based on *Agent-Based Models (ABM)*. These approaches have been widely used to study the links between agricultural activities, or other types of land use, and their environmental impacts. Specific review papers on each of these approaches are available but few are studying their combination and none is analyzing how they can be used for a PIMPAAS.

2.1. Land Use / Land Cover Change models

i. Definition

The objective of Land Use/Land Cover Change (LUCC) studies is to describe the actual land use and give insights on the possible changes of land use that could occur in the near future following either some biophysical or demographic changes (Veldkamp *et al.*, 1996a) or economic and structural changes (Verburg et al., 2004). LUCC approaches cover a wide range of methods but most of them are “descriptive models that aim at simulating the functioning of the land use system and the spatially explicit simulation of near future land use

patterns” (Verburg et al., 2004). Although a new trend is to use an agent based model to simulate the change of land use as we review it in the section 3, many studies refer to models based on projections and extrapolation via regression curves.

Land use is generally described in a raster based geographical information system (GIS). Each cell contains different economic, social and biophysical information such as population, land use, distance to the roads or markets. Statistical analyses are conducted to identify factors that are correlated with the observed past or current land use. These factors can be socio-economic aspects, such as demography and infrastructure (road, presence of a market for example), or biophysical aspects such as soil type and climate. For scenario analysis, the demand of commodities is assumed as one of the main drivers for land use change. For each scenario, a new demand for each time-step of the simulation is formulated from past trends, experts knowledge or stakeholders opinions (Veldkamp *et al.*, 1996a; Pontius *et al.*, 2001). This hypothetical demand is then translated into areas for each land use type, and then allocated to the different areas of the map considering that the drivers of land use will remain unchanged in the future (see figure 2.1 for an example of results). This allows identifying probable hotspots of land use change.

ii. Applications

Different models exist in the literature for agriculture (CLUE-S (Verburg et al., 2002), (van der Hilst *et al.*, 2010)), deforestation (GEOMOD 2, (Pontius et al., 2001)) and urban extension (White *et al.*, 2000). In CLUE (Conversion of Land Use and its Effect), correlations between the actual land use and biophysical and socio-economics factors are tested. These correlations are used to evaluate what would be the probable change in land use following a change in, for example, commodity demand, policy instruments or infrastructure development (de Koning et al., 1999).

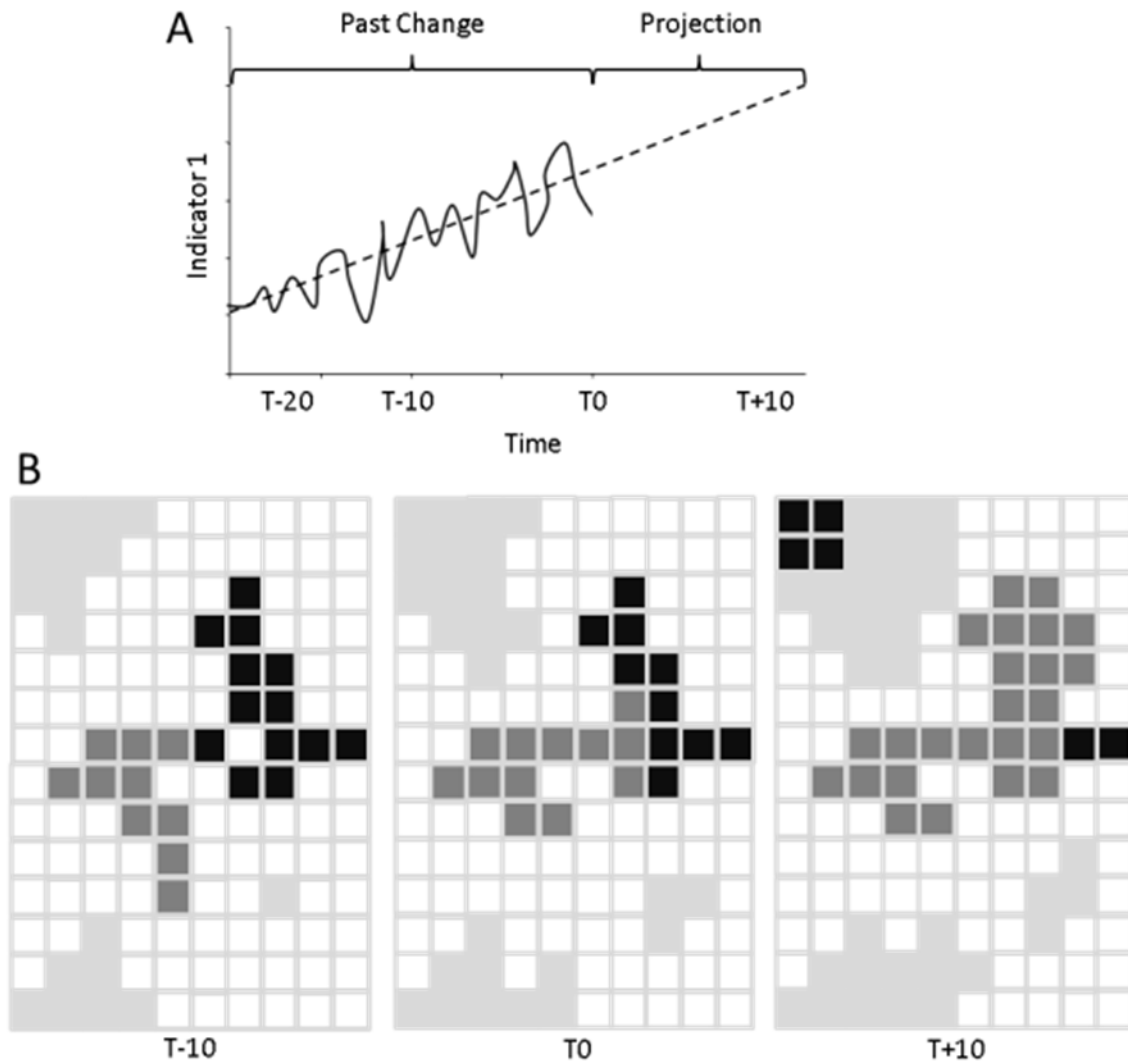


Figure 2.1: Type of results produced by land use change studies.

A: The projections for different indicators, such as the demand for commodities, are extrapolated from past trends. B: Map of land use change. Each of the color correspond to a land use, and these maps are produced for the past (T-10), the present (T0) and for the future (probable land use, T+10).

iii. Adequacy for PIMPAAS

Prospective

Original methods for LUCC were based on regression analysis of actual and past land use to identify the drivers. Projections of current demand for commodities or hypothetical future demand (exogenous factors) were done by researchers and local experts (de Koning et al., 1999) based on past trends. They are therefore not always suitable for scenarios analysis (Verburg et al., 2004) especially when new drivers of change are considered or for long term

scenarios. Attempts have been done to work with more deductive models of land use, but without improving the predictive capacity (Overmars et al., 2007). In the case of prospective studies on alternative farming systems development, this approach would also suffer from a lack of information concerning the drivers for alternative land uses if these have not yet been implemented in the analyzed region. LUCC methodologies are therefore poorly adapted to the prospective nature of the PIMPAAS approach. Lambin et al. (2000), in the same way, concluded that models integrating driver's dynamics and decision-making process at the right scale could be more suitable for simulating scenario of agricultural systems changes.

Integrated

LUCC is basically a geographical approach. It is not limited to the agricultural sector and allows studying phenomena where agriculture is in interaction/competition with other human activities, such as urban development, forestry or industry. In most of the LUCC studies, the results are reported in term of location of land cover change. Socio-economic and biophysical driving factors are taken into account, but no impact assessment of land use change on the social, economic or environmental dimensions were done until recently. In the SENSOR project (Frederiksen *et al.*, 2008), indicators of environmental impact related to the increase or decrease of specific land uses have been developed, based on empirical functions to extrapolate indicator values and get insights on the possible impacts of land use change.

Multiscale

LUCC methods are often used to build scenarios at the level of the region, country or (sub) continental. They are intrinsically spatially explicit, based on GIS and usually declined at multiple scales, depending mostly on the data's resolution. The minimum spatial scale varies from the square kilometer to 25 km², leaving the field and farm levels out of the analysis (Verburg et al., 2006; Renting et al., 2009). Each pixel of the map can be defined by its main cover (Veldkamp *et al.*, 1996b) or contain a proportion of different kinds of land use (such as agricultural land, forest, urban). Data type often implies that the basic unit of analysis is a pixel that does not corresponds to any administrative/decision unit. When data are available at lower scales, LUCC studies can be conducted with explicit data at field, farm and regional scale (Overmars *et al.*, 2006). Agricultural activities are usually defined in a simple way (Verburg et al., 2002) (e.g. cereals, orchards or vineyards, pastures) and other types of land use usually include forests, urban area, industrial area, etc. This imply that details in term of land use are low, mainly focusing on land cover and not on crop management (Verburg et al.,

2004), which is a limitation for the calculation of many indicators of the environmental impact of agriculture.

The models of land use change are dynamic (Verburg et al., 2004). In reality, land use change decisions are taken at different time scales (i.e. short and long term dynamics), but as most of the LUCC models have a yearly time step, short term decisions are not taken into account (e.g. dates of planting on a weekly basis) or aggregating over the year. However, some models have shorter time steps (e.g. monthly) (Veldkamp and Fresco, 1996). LUCC scenarios are usually analyzed with a time horizon of 15 to 50 years. This time horizon is limited by the fact that the annual change of demand for commodities is often based on projections of actual trends, making the uncertainty to increase with the adopted time horizon.

Participative

The choice of the potential driving forces to be correlated with land use is usually based on theoretical assumptions (Lambin et al., 2001) and on researcher's knowledge on the area (de Koning et al., 1999). Participation is rarely mentioned in LUCC papers. Recent studies have involved stakeholders in the building of scenarios (Biggs et al., 2007) that were further assessed with the LUCC model (Kok *et al.*, 2009). LUCC can be considered as a top-down approach, meaning that the main efforts are devoted to analyze what happen at a large scale in interactions with 'high scale' stakeholders such as regional or national authorities. An example of presentation of results in stakeholders' meetings is reported by Verburg et al. (2006) but they concluded that "...it should be noted that the presented models do not provide solutions for the natural resource management issues..." and "Presenting clear-cut solutions for land use decisions to policy makers often disregards the different opinions among stakeholders and the policy making context" (Verburg et al., 2006).

The main advantage of LUCC for PIMPAAS relies on the explicit spatial representation of current land use that might allow calculating the impact of agricultural activities on resources that are governed by drivers at the regional scale, such as water availability. Also, it allows the analysis of infrastructure and market changes as well as the delimitation of areas with low potential for agricultural use. LUCC might be a useful tool for policy makers, first to get a detailed view of the current situation as a starting point for the reflection, and then, to understand the probable consequences of their decision at regional scale. However, the commonly non-explicit representation of farm level is a disadvantage for participative studies with farmers. Moreover, the formalism of model based solely on projection of past trends

renders impossible the inclusion of alternative farming systems and up to now, indicators on the impact of different land uses are not commonly calculated in LUCC.

2.2. Bio Economic Models

i. Definition

Bio-Economic Models (BEM) are economic models that include a biological component to take into account temporal variation of agricultural activities performance and impacts due to climate and soil factors variability (Flichman, 2002).

BEM aims at identifying optimum combinations of agricultural activities that maximize or minimize an objective. Optimum systems are often obtained using a Multiple Goal Linear Programming (MGLP) model where one goal is defined as objective function, the others being described in constraint functions (Janssen *et al.*, 2007). This optimization has been done for objective functions defined at different scales, most commonly at the farm (Janssen *et al.*, 2007) and regional levels (Laborte *et al.*, 2007).

ii. Applications

Mathematical programming, at the basis of BEM, has become a common tool in agricultural sciences in the last decades in support for decision-making and assessment of agricultural systems. Mathematical programming offers several optimization techniques, Linear Programming (LP) being the most commonly used. LP has been widely used in agricultural economics with the objective function representing the economic rationale of the farmer's decision process, and the optimization process aiming at identifying the combination of agricultural activities that maximize an utility function. This utility function combines all objectives and constraints in a unique unit (utility). MGLP models are commonly used where objective functions and constraints are represented in separate equations keeping their own units, in order to allow for a multi-criteria analysis taking into account indicators hardly convertible in money. This approach allows assessing different scenarios on the basis of multiple indicators, and identifying trade-offs among the indicators (figure 2.1).

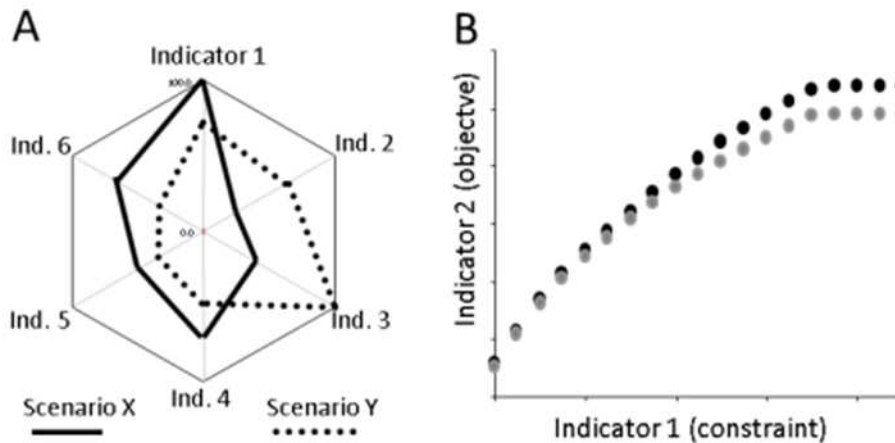


Figure 2.2: Type of results produced by bio-economic models.

A: Spider diagram representing two different scenarios assessed on the basis of 6 indicators.

B: Trade-off curve between two indicators.

In BEM, agricultural activities are quantitatively described at the field or livestock unit level by their inputs and outputs (called technical coefficients) representing their performance in terms of desired goods and the environmental externalities attached to them. Commonly, each activity can be described by a set of data that gives information on labor, nutrients balances, greenhouse gas emissions, use of inputs, expected performance considering inter-annual variations. These data can be obtained from different sources such as interviews with farmers, experimental data (Roetter et al., 2007b), expert knowledge (Kerselaers et al., 2007) and models (crop, livestock, soil dynamics models) (Roetter et al., 2005; Semaan et al., 2007; van Ittersum et al., 2008). Technical coefficients generators (Hengsdijk et al., 1999) can be developed that summarize the main processes and generate the inputs and outputs used for optimization models.

iii. Adequacy for PIMPAAS

Prospective

BEM helps in understanding orientation of farming systems with respect to long term strategic objectives (van Ittersum et al., 1998). However, it could also give some insights on tactical decision aspects in case of dynamic linear programming (or multi period linear programming) where the pathways to attain an end-point are studied by simulating year to year decisions in accordance to a long term objective (Hazell et al., 1986; Louhichi et al., 2004; Acs et al., 2007; Cittadini et al., 2008).

The combination of descriptive models (mechanistic and empirical) for quantifying the technical coefficients of alternative activities and MGLP models is commonly used for the evaluation of the plausible consequences of a combination of external trends and technological changes combined in a scenario (Belhouchette et al., 2010). The Target Oriented Approach (TOA) has been developed for prospective studies when data are scarce about performance of specific alternative activities (Hengsdijk *et al.*, 2002). In the TOA, the calculation of technical coefficient is based on first production levels that are evaluated depending on local conditions (climate, soil, techniques) for all activities, and then the needed inputs for such production are calculated with models. Lopez-Ridaura (2005a) identified three main types of scenarios analyzed by BEM: (i) evaluating the consequences of conflicting objectives by contrasting different objective functions or by maximizing or minimizing one objective while setting another objective as constraint (Lu *et al.*, 2004; Lopez Ridaura, 2005b), (ii) changing the activities considered in the optimization by either adding a new set of activities or changing the values on the technical coefficients (eg. a new alternative such as Integrated Soil Fertility Management or Green manures) (Waithaka et al., 2006; Cittadini et al., 2008) and (iii) changing one of the parameters of the model such as prices, premiums or taxes (Semaan et al., 2007). In fact, an infinite number of scenarios can be built by combining these three types.

Integrated

BEM (using MGLP) is commonly used for integrated analysis of farming systems, as it allows the use of different indicators in the assessment. Economic and environmental indicators are often used in BEM, however, social aspects and indicators remained rarely used as they are difficult to assess (Janssen *et al.*, 2007). Results of BEM are often presented in the form of trade off curves (Lu *et al.*, 2004; Lopez Ridaura, 2005b; Janssen *et al.*, 2007), showing the compromises between two or more indicators representing conflicting objectives.

Multiscale

BEM are commonly applied at farm level (Janssen *et al.*, 2007). Using this level allows keeping a strong emphasis on the basic unit of decision in the agricultural systems, the farm household or enterprise. However, several studies have been done for policy analysis at higher levels such as the region (van Ittersum et al., 2004; Roetter et al., 2005), the nation, or the continent (van Ittersum et al., 2008). In fact, as agricultural systems are considered as multifunctional systems providing a large series of good and services at different scales, the main trend nowadays is to develop multi-scale BEM models that formulate different

objectives function and constraints at different scales. For example, Laborte et al. (2007) presented a methodology where different scales of analysis were simulated by different models but without links among them. Lopez Ridaura et al (2005b) proposed a procedure for up and down scaling with BEM in which the field is considered as the building block, and through optimization function, up-scaling is done from field to region, or from field to household to region : “The basic principle underlying such an M-MGLP [Multiscale – Multiple Goal Linear Programming] is that the objectives of stakeholders at one scale can be included as constraints for optimization at other scales” (Lopez Ridaura, 2005b).

BEM is appropriate for multi-scale evaluation up to regional level. One of the main concern, although not specific to BEM, remains the error propagation through the aggregation procedure and the modeling chain (Jansen *et al.*, 1998).

Most BEM are static, however in dynamic LP the time scale is often the year. The time extent can go to fifty years but as the uncertainty is very high, the tendency is to reduce the time horizon as much as possible, sometimes down to a few years (Janssen *et al.*, 2007).

Participative

BEM have rarely been used in direct interaction with stakeholders as it requires their training in the use of such models and on the analysis of results (Sterk, 2007). Many attempts have been made to associate stakeholders in a dialogue based on BEM results, but with limited achievements (van Ittersum et al., 2004; Roetter et al., 2007a). Castella et al. (2007a) report that local stakeholders had found the modeling approach interesting to identify the biophysical limits of agricultural systems but their interest decreased when seemingly unreasonable results appeared (such as converting a whole region into a single crop). Sterk (2006) argued that using BEM models with stakeholders gives a strong role to the researcher, that must be legitimated, and that it becomes an interesting tool in a context where “reframing” the systems might become necessary. Also, a better “contextualization” of the models results, i.e. analyzing each indicator in a specific context such as the farm type in Blazy et al. (2009b), could facilitate the use of BEM models with stakeholders even if it can become highly time consuming and too much site-specific (Sterk et al., 2007). Also, farmers or other stakeholders are represented as rational individuals, whose aim is to optimize one objective having complete information for decision-making (Parker et al., 2003; Parker et al., 2008). This does not take explicitly into account all the social relationship established among

stakeholders, the existence of farmers groups and the multiple influences that affect farmer's decision-making.

Despite these limits, several projects such as EULACIAS (Rossing, 2009) have used BEM in a system approach to assess scenarios of development of new agro-ecosystems with local stakeholders, but the efficiency of BEM for participative assessment remains low. BEM is a suitable approach for prospective studies of alternative agricultural systems, and is nowadays the most commonly used in agricultural research. Integrated and multiscale capacities of BEM have been much more developed than the participative aspect.

2.3. Agent-Based Models

i. Definition

Agent Based Models (ABM) represent systems as agents in interaction, with a social structure, and using resources in an specified environment. Agents perceive, self-represent and act in their environment by taking decision and interacting with other agents. Each agent has its own tendencies and objectives (Ferber, 2006). ABM is an approach originally developed from computer sciences to study the dynamics of complex systems and reproduce phenomenon that emerge from the addition and interactions of individual behaviors. ABM can be based on multiple formalisms for representing the decision-making process by the agents. This usually requires a large quantity of information, as the behavior of each agent has to be defined. In case of human agents, decision-rules are often defined with thresholds and if-then-else rules. When agents are representing bio-physical components of the system, such as animals or abiotic resources, some more mechanistic models of the processes can be used. ABM can be seen as a very flexible tool, one of the main advantages being the possibility to explicitly represent the interaction between agents (several agents of the same type or several types of agents) and one or several natural resources.

ii. Applications

These individual centered approaches are increasingly used to represent nature-society interactions (Ligtenberg et al., 2004; Monticino et al., 2007), in particular in the domain of natural resources management (NRM) (Mathevet *et al.*, 2003; Bousquet *et al.*, 2004; Castella, 2009). Specific platforms such as CORMAS (Bousquet et al., 1998), NetLogo (Tisue *et al.*, 2004) and SWARM (Railsback et al., 2006) allow to create simulations where several agents are interacting with one or more resources.

For NRM studies, ABM often use a grid for spatial representation of land and simulate the decision-making process of individuals on the use of these spatial units (Bousquet *et al.*, 2004) (figure 2.3). This arrangement of models allows studying the interaction between the resources (represented as different colors in figure 2.3 A) and the decisions of agents (represented as cows in the figure, as an example) in a dynamic manner (figure 2.3 B). An agent is often linked to a specific area on which he is acting and his behavior depends on its own objectives and on its interactions with the environment and other agents. Results can therefore be analyzed for each agent, in a dynamic manner.

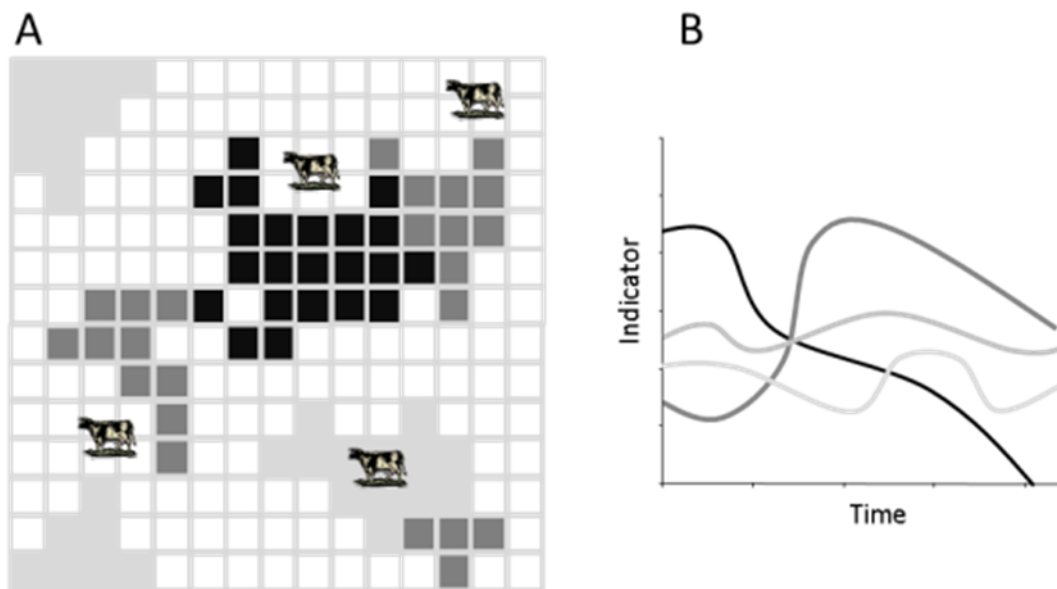


Figure 2.3: Type of results produced by agent-based models.

A: Example of a spatial grid with different levels of a resource (different colors) and agents (cows). B: Evolution of an indicator along time of simulation for four agents, as an example of presentation of results.

iii. Adequacy for PIMPAAS

Prospective

ABM allow to explore different management systems or combination of agent behavior and to analyze the evolution of the system. In agricultural sciences, ABM have been used for prospective studies elucidating future land use by simulating, for example, the diffusion of innovations (Kaufmann *et al.*, 2009) and/or the implementation of a concerted action in terms of access to resources (Becu *et al.*, 2003). ABM help to understand if certain strategies (individual and collectives) at different levels can stimulate an expected change and what can be the side-effects of these strategies. It also allows to identify bottlenecks of policies or management plans (Piorr *et al.*, 2009).

ABM are also used in role playing games to explore future situations and elucidate the behavior of actors and the results on the performance of the system under hypothetical future situations (changes of prices, catastrophes, new regulations, see for example Becu et al. (2008)).

ABM are very flexible tools that can include different types of formalisms, sometimes mechanistic. For example, the dynamic of specific natural resources (e.g. water) is commonly represented with simulation models (See for example, (Becu et al., 2003) where the dynamics of the water resource is calculated using a water balance model and a hydraulic model). ABM is a suitable approach for prospective studies however the difficulty remains in finding generic decision-rules for agents in relation to the adoption of alternatives systems.

Integrated

ABM is based on agents' decisions and resources' dynamics. As many compartments of the systems can be simulated and their behavior evaluated by the agents, many indicators can be calculated either in relation to the state of the resource or to performance of the system itself. When studies using ABM put emphasis on ecological process (Simon *et al.*, 2009) or NRM (Bousquet *et al.*, 2007a), environmental indicators are the most represented. When used for simulating economic decision and social interactions between agents, both economic and social indicators are used (Happe et al., 2006; Barnaud et al., 2008). ABM is therefore appropriate for multi-criteria studies.

Multiscale

In agricultural and NRM applications of ABM, several spatial scales can be taken into account and, usually, an explicit spatial representation, either real or stylized, is used (Castella et al., 2005; Castella, 2009). The individual field is usually defined as the basic spatial unit. The farm is represented as a group of fields and with a set of decision rules at that level. Usually ABM are used to simulate a watershed (Becu et al., 2008), a small region or an administrative region (Valbuena et al., 2008). Usually, farm typology is used to simplify the model building and to limit the need for data on individual farms (Valbuena et al., 2008), while taking into account the diversity of farmers' decision-making process (Bakker *et al.*, 2009). The advantage of this modeling approach is the description of processes at multiple scales and their interaction. The impact of the decisions of each agent is integrated through indicator calculations at the relevant scale of analysis, avoiding therefore simplistic aggregation procedures. The time scale adopted in ABM of agricultural systems varies from

months or cropping seasons to years or decades. It mainly depends on the objectives of the ABM study and the processes simulated. If the role of the model is to identify emerging properties or to analyze agents behaviors, between 100 and 1000 time-steps are necessary to observe significant changes (Caillault *et al.*, Submitted). The time horizon and the time step are therefore closely related. For example, Becu *et al.* (2003) use a time step of 10 days for a time horizon of 10 years, meaning that the model is run for 365 time steps. Considering these features, ABM models are powerful for multiscale (in both space and time) evaluation.

Participative

Finally, ABM has gained popularity in the agricultural domain because of its high suitability for participative studies (Castella *et al.*, 2005; Gurung *et al.*, 2006; Becu *et al.*, 2008). A “Companion Modeling” group (Antona *et al.*, 2005) has developed a participative approach, based on ABM, where the main objective is to promote a dialogue between stakeholders and farmers. Participation can occur at different steps of the methodology, from the model construction phase (to identify the role of the stakeholders and their actions on resources as well as their perceptions and empirical knowledge) to the participative analysis of simulation results (Simon *et al.*, 2009). Stakeholders meetings, focus group and role playing games, among other participative methods have been used to organize the exchange of ideas and evaluate scenarios (Gurung *et al.*, 2006; Becu *et al.*, 2008). The use of ABM aims at improving knowledge of stakeholders, facilitating their dialogue and improving the negotiation between stakeholders with different viewpoints and conflicting objectives (Barnaud *et al.*, 2008). As stakeholders are formally represented in the model, their interests for the model and the simulation results is high and exchanges based on simulation results can be strong (Becu *et al.*, 2008). This type of approach seems therefore appropriate for a participative evaluation of alternative farming systems.

ABM is a flexible approach allowing the use of different formalisms. However, for prospective studies concerning agricultural systems, it requires deep knowledge on the actors’ behaviour, preferences and constraints. ABM is suitable for integrated and multiscale studies and, for participative studies, it is the approach for which the strongest experiences has been acquired.

2.4. Comparison of land use change, agent based and bioeconomic models for PIMPAAS

Before comparing the three approaches on the basis of their suitability for a PIMPAAS study, it has to be acknowledged that LUCC, BEM and ABM are not targeted to the same type of studies. LUCC aims at studying where land use change is the more probable to occur, while BEM aims to study what kind of combinations of agricultural activities are possible for a given future (with an objective in mind) and ABM is targeted to explore different pathways and natural resource management systems. In table 2.1, the three approaches are screened with keywords for each of the main aspects of PIMPAAS requirements. In grey are highlighted some aspects of the approaches that are not, or only moderately (light-gray), suitable.

For *prospective* assessment of agricultural systems, BEM and ABM are the most suitable. Complementarities between these two approaches can be envisaged such as the use of BEM for identifying plausible combinations of agricultural systems and ABM for identifying and simulating interactions between decision makers and stakeholders that could enhance the attainment of common objectives for a future. LUCC does not seem suitable for prospective evaluation of agricultural systems (only current and past activities, based on past general trends and not taking into account the farm household as the basic unit of analysis) due to the inadequacy of the formalism for alternative systems.

For *integrated* analysis of agricultural systems, BEM and ABM intrinsically incorporate multiple indicators: ABM in the form of criteria used by agents to take their decisions (normally not only one criterion) and BEM in the form of objective functions and constraints in the optimization. In LUCC, main efforts have been directed towards improving the confidence on the probabilities for land use change. Less emphasis has been given to the quantification of the impacts of such change and therefore integrated analysis of the consequences of such land use change is not carried out in LUCC studies.

For *multi-scale* agricultural systems assessment, BEM and ABM have been applied at different time and space scales, from the farm to the large region, from one to several year. As these two approaches are able to take into account decisions of actors, including farmers, they appear more suitable than LUCC approaches, that were mostly carried out at high spatial levels ((sub/supra)national) and at long time horizon (eg. 30 years), therefore not allowing the explicit consideration of farm level decision making and its impacts at the regional level.

LUCC can be characterized as a top-down approach, meaning that it is devoted to policy makers giving instructions or ideas for management at lower levels. BEM can be bottom-up or top-down depending on the system (eg. a farm or a region) to which LP is applied. It is bottom-up when decisions and viewpoints at low scale guide decision-making at higher scale. Inversely, BEM can be top-down when an optimization at regional level guides the decisions at lower levels. ABM, as an individual based approach, is always a bottom-up approach. As changes in agricultural systems are expected to come from farmers choices, a bottom-up approach seems to be more relevant, even if top-down approaches can give interesting insights on the systems behavior (Castella *et al.*, 2007a). No experience of LUCC approach applied in a participatory manner has been found in the literature. For BEM, results of *participatory* use are mixed as shown before, while ABM have good capabilities for participatory processes.

In conclusion, LUCC, BEM and ABM have advantages and drawbacks for PIMPAAS (table 2.1) and complementarities between them have been identified.

Table 2.1: Comparison of the three approaches on the basis of their suitability for PIMPAAS.

	<i>Prospective</i>	<i>Integrated</i>	<i>Multiscale</i>	<i>Participative</i>
LUC	<ul style="list-style-type: none"> • Based on statistical analysis of drivers of Land-Use and on projections. • Validation through base-year simulation. 	<ul style="list-style-type: none"> • Commonly no indicators. • Recent developments allow calculation of simple indicators on environmental, economic and social aspects. 	<ul style="list-style-type: none"> • Disaggregation through statistical analysis. • Minimum scale close to the square kilometer. • No explicit consideration of field and farm level • Always spatially explicit. 	<ul style="list-style-type: none"> • Top-down approach. • No explicit representation of the stakeholders and their objectives. • Suitable for high scale stakeholders' negotiation (country, region). • Lack of farm level analysis.
BEM	<ul style="list-style-type: none"> • Target oriented approach. • Mechanistic model. • Validation through sensitivity analysis. 	<ul style="list-style-type: none"> • Multiple indicators (social, economic and environmental) represented through the objective function and constraints. 	<ul style="list-style-type: none"> • From field to farm and field to region. • Simple aggregation to up-scale from field to farm and region. • Seldom spatially explicit. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bottom-up and top-down approach. • No explicit representation of stakeholders' behavior except through objectives. • Criticized for non-realistic results • Limited success in its application for negotiation.
ABM	<ul style="list-style-type: none"> • Individual based decision rules. • Empirical and mechanistic modeling. • Validation through behavior exploration. • Based on local knowledge. 	<ul style="list-style-type: none"> • Multiple indicators (social, economic and environmental) represented through decision-rules of the different stakeholders. 	<ul style="list-style-type: none"> • From field to territory. • Explicit consideration of farm level. • No aggregation procedure, scaling is done through indicator calculation and observation of emerging properties. • Often spatially explicit. 	<ul style="list-style-type: none"> • Bottom-up approach. • Explicit representation of stakeholders (agents) and their decision rules, taking into account perceptions and empirical knowledge. • Commonly used in role playing games as a tool for negotiation.

In grey are highlighted some aspects of the approaches that are not or only moderately (light-gray) suitable.

3. Combined applications of the three approaches for PIMPAAS

To overtake some of the limitations of the three approaches presented above, several “coupled”, “combined” or “hybrid” approaches have been developed in the last decade.

Parker et al. (2003) and Verburg et al. (2005) have suggested to use ABM for LUCC studies to take into account the actor’s decision process. Using ABM to conduct LUCC studies was identified as a promising approach in land use research in the early 2000 (Castella *et al.*, 2007b; Matthews *et al.*, 2007; Bakker *et al.*, 2009). By trying to reproduce the farmers and other agents behavior, these models aim to predict land use change. This allows to include aspects of the three pillars of agro-ecosystems sustainability (environment, economy and social) in the evaluation and to explicitly simulate decision-making by the agent in terms of land use, up to regional scale (Valbuena et al., 2009). For PIMPAAS, two methodological issues arise from this use of ABM for LUCC studies: (i) the analysis is often restrained to current agricultural activities as it is based on local stakeholders knowledge and decision rules with existing systems. This hinders the possibility for scenario analysis where alternative systems could be introduced. (ii) It remains difficult to simulate the decision-making process leading to adopt an alternative system, which in agriculture is strongly driven by economic objective. Overmars et al. (2007) compared prediction of land use change realized using a classical LUCC model, CLUE-S, and an agent based model. They concluded that the LUCC model predicted with more accuracy the observed changes in a region, than the ABM. This was due to the difficulty to get proper data and to the current limitation in the formalization of the decision-making process. Reproducing this remains a strong issue in land use and integrated assessment research.

As proposed by Berger (2001), this issue could be tackled by coupling an ABM and BEM, where each agent defined in the ABM takes its decisions on the basis of an optimization done for its specific system by the BEM. A recursive linear programming model is used where at each time step an agent optimizes an objective function with new sets of constraints imposed by the performance of the system in the previous time step. This hybrid approach has been applied in different countries and for different questions: multifunctional agriculture (Kjeldsen et al., 2006), policy development for less-favorable area in Europe (Berger et al., 2006), analysis of agricultural policy in Europe (Happe et al., 2006), land use decision in developing countries (Schreinemachers *et al.*, 2006), links between soil fertility and poverty dynamics in Uganda (Schreinemachers et al., 2007) and crop choice and irrigation in a watershed in Thailand (Becu et al., 2003). The combined use of BEM and ABM should

therefore allow overtaking the main limits of each individual method for a PIMPAAS: BEM should improve ABM by delimiting the “window of opportunities” for agricultural development and identifying the limits of the systems’ performance with trade-off curves between different indicators. However, it sets the playing field or the window of opportunities ignoring some key issues in actual decision making such as partnership, networks, neighborhood effects or negotiation. These last points can be formalized in ABM, making the two approaches complementary. Recent projects have used a coupled approach for assessing future common agricultural policies of European Union, in which different scenarios are compared (Piorr et al., 2009).

Castella et al. (2007a) reported the separated applications of the three approaches applied to a single territory in Vietnam. There, a LUCC study was applied using CLUE and allowed to identify the main drivers of land use change. BEM was applied in a top-down approach and helped to identify trade-offs between stakeholders objectives and agricultural systems that could fulfill these objectives at regional level. ABM was used with local stakeholders to derive their decision-rules and explore different pathways for more sustainable agriculture in the region. They concluded on the possible complementarities of the three approaches: BEM defines an area of possible options within the limits imposed by the biophysical and socio-economic resources. These resource constraints can be included in the demand scenarios of LUCC. It is argued that this could be done through the use of the decision-rules that can be derived from an ABM and its use in role playing games. By this way, BEM and LUCC could contribute to build an ABM that would serve to evaluate scenarios quantitatively and in a participative manner.

4. Conclusion: combining LUCC, BEM, and ABM for PIMPAAS?

New CAP reform, volatility of commodities and input prices, climate change, and many other expected and unexpected changes will be responsible for agricultural changes. For farmers, as for other stakeholders, it becomes necessary to get prepared to this unpredictable future. At the same time, policies for sustainable agriculture are being developed as well as new alternatives, often poorly adopted by farmers. Setting a dialogue among stakeholders acting at local/regional levels and the final decision makers on the land use, i.e. the farmers, to assess plausible futures and negotiate consensus on a better way to manage the agricultural lands could help overlapping the current issues in cropping and farming system design. For such stakes, ex-ante evaluation of alternative cropping systems may give guidelines to be included

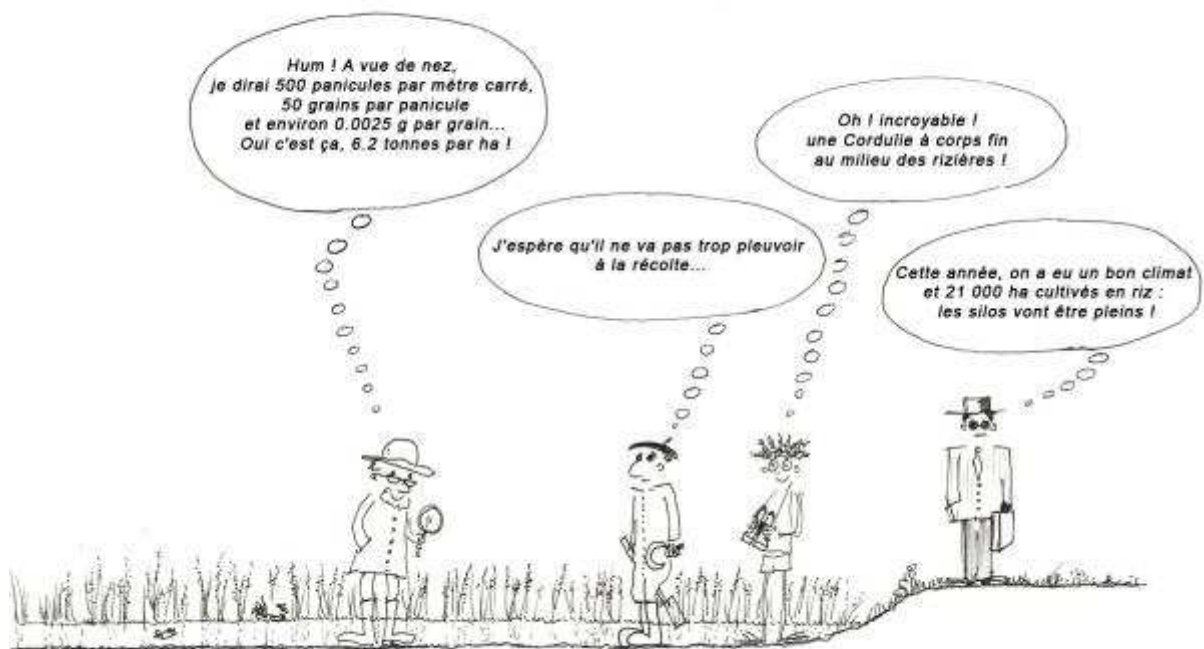
from the beginning of the design process of innovative cropping systems (Blazy et al., 2009a). Together with ex-ante assessment of their interactions with policies and economic changes (Therond et al., 2009) it could give insight on pathways toward sustainable development of an agricultural region.

Looking beyond the pros and cons of LUCC, BEM and ABM to set up such evaluation and negotiation process, our analysis concludes on the need to combine these three approaches in a PIMPAAS methodology. Combining the different approaches in a single application may allow overcoming the limits of each approach for PIMPAAS. LUCC model can be applied to get and share an understanding of the current situation, and to identify some biophysical and socio-economic constraints that influence farmer choices and stakeholders objectives. However, this kind of approach cannot be easily conducted in a participatory manner due to the fact that no decision is explicitly simulated. It could therefore be used to produce knowledge about the probable spots of change. For PIMPAAS, the farm level should be explicitly taken into account, what could allow better analysis of the systems. BEM may be used to enhance discussion with stakeholder at sub-regional and regional scale. Objectives of stakeholders are formulated in a multi-scale BEM (as objective function and constraints) which allows comparing the current situation and possible different configuration of the systems at regional and sub-regional scale, and at farm scale as well for different farm types. This would allow stakeholders to get a detailed point of view on which agricultural configurations are possible and desirable and which not. These configurations of lands could then be presented to farmers that can discuss with other stakeholders on the advantages and drawbacks at farm scale of implied changes. An ABM could be used to formalize farmers' decision making and to test different pathways of adaptation for a given scenario. This ABM would allow the stakeholders to have a view on the level of achievement of their objectives (through indicators calculated at regional and sub-regional scales) and enhance discussion and negotiation on these objectives.

Synthèse partielle

Dans ce chapitre 2, nous avons analysé les contributions potentielles de trois grandes approches de modélisation (la modélisation des changements d'usage du sol, la modélisation bioéconomique et la modélisation multi-agents) pour la réalisation d'une évaluation intégrée, participative, multi-échelles et prospective de systèmes agricoles dans un territoire. Aucune de ces approches ne possédant toutes les qualités nécessaires, nous proposons d'étudier leurs possibles complémentarités en les mobilisant au cours d'une seule et même démarche.

Le temps du terrain...



Chapitre 3 : Engagement des acteurs : quelques éléments méthodologiques mis en œuvre dans le cadre de l'évaluation participative de scénarios d'évolution de l'agriculture en Camargue

1. Introduction : Finalités des recherches participatives

Les recherches dites « participatives » ont été développées dans de nombreux domaines y compris l'agronomie, avec souvent une multitude d'objectifs à la clé. Depuis les travaux pionniers de Chambers (1989), la préoccupation d'associer les bénéficiaires des recherches n'a cessé d'exister et s'est étendue, au-delà des agriculteurs eux-mêmes, aux acteurs en charge de la décision politique, à l'échelle régionale mais aussi nationale voire continentale. Neef et Neubert (2010) ont réalisé un état des lieux de ces types de recherches et mis en évidence la diversité des degrés de la participation (de la simple exposition et discussion de la problématique à des méthodes mobilisant beaucoup plus étroitement les acteurs de terrain tout au long du processus d'investigation). En France, dans le domaine agricole, les questions soulevées par la participation des acteurs ont notamment été traitées sous le vocable de recherche-action (Liu, 1997) voire de recherches-action en partenariat (RAP) (Faure *et al.*, 2010).

Dans ce paradigme scientifique, les relations entre les chercheurs et les acteurs font l'objet d'une réflexion méthodologique propre ; ces relations sont formalisées, planifiées et organisées autour d'arènes d'échange et de concertation mobilisant des méthodes et outils spécifiques (par exemple les outils de la facilitation : « brainstorming », « focus-group », modélisation participative (Bousset *et al.*, 2005). L'objectif a minima est d'identifier une problématique partagée grâce à laquelle les chercheurs vont pouvoir avancer dans leurs questions scientifiques et où les acteurs pourront trouver des éléments pour résoudre leurs problèmes ou se voir proposer des chemins pour y parvenir. Cette conception de la recherche est par nature constructiviste et holiste. Elle va plus loin que le partage de la problématique, en considérant que les savoirs des acteurs sont autant légitimes que les savoirs scientifiques pour la construction de la réponse à la question posée (Gasselin et Lavigne-Delville, 2010). Ce courant de recherche propose, dans ses fondements, de co-construire les connaissances, en associant savoirs scientifiques et savoirs profanes. Parmi les outils utilisés pour arriver à cette fin, la modélisation joue souvent le rôle « d'objet intermédiaire » (Etienne *et al.*, 2010). Le courant dit de « modélisation d'accompagnement », a formalisé les principes d'une démarche

mettant en œuvre des outils de modélisation pour résoudre des problèmes de gestion collective de ressources naturelles dont les acteurs de la gestion de la ressource et les chercheurs se sont au préalable construits une représentation partagée (Etienne, 2010).

Cependant, toutes les recherches ne peuvent être conduites avec un fort niveau d'engagement des acteurs. Dans le domaine agricole, la plupart des études à caractère prospectif¹⁰ n'ont d'ailleurs pas été conduites de manière participative, traduisant le fait que toutes les questions et tous les objets de recherche ne se prêtent pas facilement ou utilement aux méthodes participatives. Ainsi, aux échelles nationale ou supra-nationale (e.g. les projets Seamless (van Ittersum *et al.*, 2008) ou Sensor (Helming *et al.*, 2008)), et pour des objectifs de production de connaissances pour la définition de nouvelles politiques publiques, le recours aux acteurs n'apparaît pas toujours nécessaire. Les expériences d'associations d'acteurs sont plus fréquentes lorsque les études sont réalisées (i) à l'échelle d'une petite région agricole, par exemple pour la gestion d'un bassin versant (Becu *et al.*, 2003) et (ii) dans un contexte où une question précise de gestion de ressources naturelles partagées est posée (Simon *et al.*, 2010).

L'analyse de la littérature relative aux études prospectives incite à penser que l'association des acteurs d'un territoire pourrait faciliter la réalisation et améliorer les résultats des investigations. Ainsi, par exemple, van Ittersum *et al.* (2004), dans le cadre du projet SysNet dont un des objectifs était de développer une méthodologie opérationnelle pour aider à l'exploration de scénarios d'usage du sol avec les porteurs d'enjeux d'un territoire, relèvent trois conditions pour la mise en œuvre de ce type de démarche : (i) le choix des acteurs est primordial, tout comme la façon de les contacter et de les associer au travail, (ii) il est nécessaire d'entretenir des relations bilatérales entre l'équipe de chercheurs et chaque acteur (des réunions collectives n'étant pas suffisantes pour créer une relation de confiance) et enfin (iii) il est nécessaire d'exposer et partager clairement les objectifs, les capacités et moyens de réalisation du projet et les outils mobilisables pour que les résultats correspondent aux attentes des acteurs. Ces recommandations sont également formulées par Sterk (2007) et Castella (2007a) qui, de plus, argumentent sur la nécessité de mettre en œuvre des approches participatives pour légitimer les résultats des évaluations prospectives.

Il semble donc opportun que les acteurs soient associés aux démarches de construction et d'évaluation de scénarios afin que, comprenant la démarche, ils discutent les orientations et

¹⁰ Le terme « étude prospective » regroupe les études visant à l'élaboration de scénarios possibles, sur la base de l'analyse des données disponibles, et a pour but d'aider à la décision stratégique.

les choix, valident les données intermédiaires utilisées et considèrent les résultats finaux, si ce n'est comme « la » solution, du moins comme faisant partie du champ des possibles. Patel et al. (2007) voient, dans l'association des acteurs pour la construction et l'évaluation de scénarios, la poursuite de trois objectifs :

- engager et/ou assister les acteurs dans une dynamique de réflexion collective sur l'évolution des systèmes agricoles, via la mise en débat et l'usage de raisonnements et outils habituellement utilisés par la recherche et l'appropriation de résultats d'études (Steyaert et al., 2007; Becu et al., 2008) ;
- valider et légitimer les résultats aux yeux des acteurs, ce qui permet de s'assurer que les résultats sont compréhensibles et utiles pour eux. Ce type de validation est aussi utile pour la recherche, puisque le regard critique des acteurs est une étape contribuant à la validation scientifique des résultats (Becu *et al.*, 2008) ;
- orienter les travaux de recherche et assurer leur pertinence, via la prise en compte des connaissances, objectifs et rationalités des acteurs (Steyaert et al., 2007).

En ce qui concerne cette thèse, le questionnement initial (l'impact du développement de l'agriculture biologique (AB) sur un territoire) était bien posé à l'échelle d'un territoire agricole, la Camargue, mais il ne correspondait pas à une commande ou un intérêt spécifique exprimé ouvertement par un ou des acteurs locaux. Il ne correspondait pas non plus à un problème de gestion de ressources rares à partager entre acteurs hétérogènes. Comme indiqué dans l'introduction générale (chapitre 1), le contexte (géographique, naturel, agricole ...) semblait néanmoins propice et adéquat pour la construction et le test d'une méthode d'évaluation ex-ante des conséquences territoriales de transformation radicale des systèmes agricoles. De plus, l'engouement national et européen pour l'AB suscitait des interrogations fortes sur les conséquences d'une extension de ce mode de production. La Camargue pouvait jouer un rôle de laboratoire pour traiter cette question. Pour cela, dès le début du projet, la mise à contribution des acteurs concernés a été placée au centre de la réflexion car il ne semblait pas possible de mener à bien une telle recherche sans leurs apports et implications. En effet, beaucoup de données manquaient pour la réalisation du travail ; par ailleurs, nous souhaitons engager les acteurs dans une réflexion sur le devenir agricole du territoire, prendre en compte les objectifs et rationalités des acteurs agissants dans ce territoire, et dans une certaine mesure, orienter les travaux en fonction de leurs attentes, incorporer leurs connaissances et valider les résultats.

Pour autant, de nombreuses interrogations demeuraient : quel type de recherche participative mener ? Quels acteurs associer et jusqu'à quel degré de participation était-il nécessaire et souhaitable de les engager dans ce projet ?

Sans prétendre mettre en œuvre complètement l'une ou l'autre des démarches évoquées précédemment, nous nous en sommes inspirées pour réfléchir à la construction d'une approche participative adaptée à notre projet. L'objectif de ce chapitre est de rapporter la première étape du projet, qui a consisté à la mise en place de la démarche participative. Celle-ci a débuté sur le terrain par l'identification des acteurs à associer à ce travail, leur rencontre, l'exposition et la discussion du projet, puis l'identification des scénarios qui leur semblaient les plus pertinents, et les critères et indicateurs qu'ils souhaitaient utiliser pour les évaluer.

2. Matériels et méthodes

2.1. Conception a priori du dispositif de participation

Nous avons dans un premier temps formalisé les différentes étapes du projet à mettre en œuvre pour aboutir à l'évaluation participative de scénarios d'évolution de l'agriculture. Dans un second temps, la participation des acteurs a été réfléchi pour chaque étape en termes d'objectifs et de moyens à mettre en œuvre. Ainsi, les objectifs de la participation pour chaque étape varient entre les trois objectifs-types exposés dans les paragraphes précédents (Patel *et al.*, 2007) (figure 3.1). Il s'agit d'engager les acteurs, de légitimer l'équipe de recherche, de construire une relation de confiance (Baretteau et al., 2010) et d'orienter les choix de scénarios au cours de la phase 1 et 2, d'acquérir et valider des données (phases 3) et finalement de s'assurer de la pertinence et de l'utilité des résultats (phase 4 et 5).

Pour atteindre ces objectifs, nous avons envisagé de mettre en œuvre différentes méthodes, parmi lesquelles des entretiens individuels, des réunions collectives de restitution, des focus-group, des séances collectives de simulation ou de jeux de rôle.

Ce plan de mise en œuvre par étapes nous paraissait avoir plusieurs avantages : (i) assurer une continuité des contacts entre les acteurs et l'équipe de recherche et (ii) mettre en œuvre des méthodes différentes de manière à renouveler la façon avec laquelle seraient conduits les échanges. Cependant, cela demandait de la part de l'équipe gérant le projet, une disponibilité pour l'organisation d'un grand nombre de réunions, ainsi qu'une capacité de mobilisation des acteurs, ce qui n'allait pas toujours de soi.

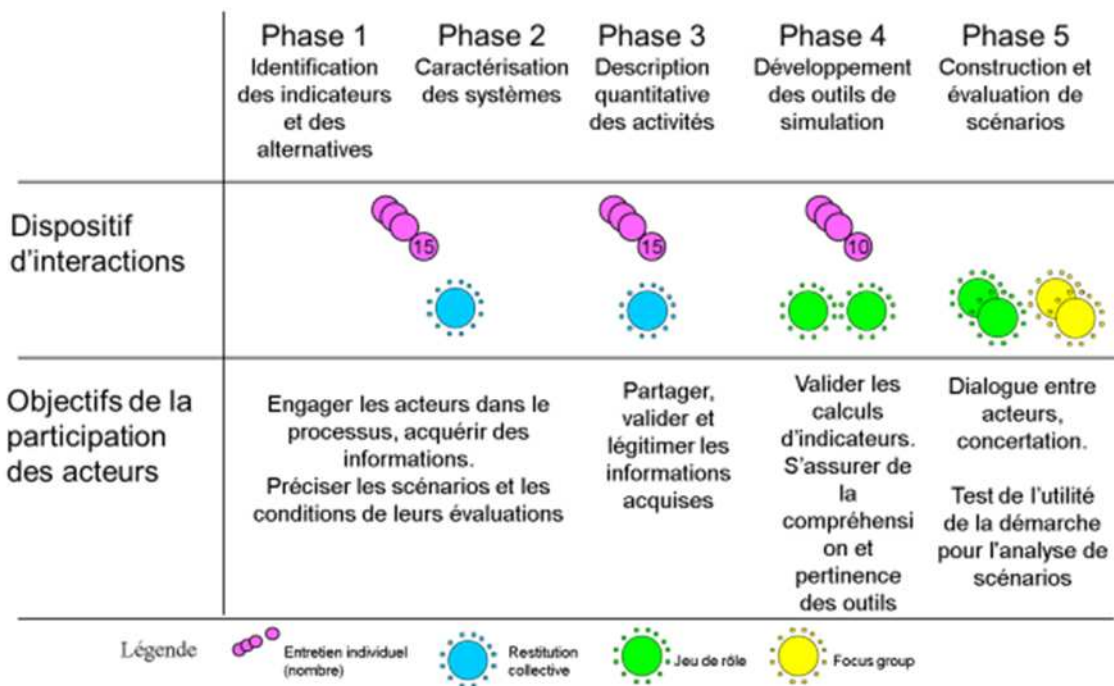


Figure 3.1 : Déroulement prévisionnel des interactions avec les acteurs locaux du territoire au cours des quatre phases de la démarche.

Différentes méthodes peuvent être mobilisées pour leur mise en œuvre : des entretiens individuels, des réunions collectives, des jeux de rôles ou des focus group. A chaque phase sont associés un ou des objectifs de la participation des acteurs à leur réalisation.

La mise en œuvre effective du projet s'est accompagnée de modifications de ce plan prévisionnel. Nous développerons, dans la discussion finale, comment la rencontre des acteurs et le travail accompli avec eux, nous ont amenés à modifier les étapes et outils de participation prévus initialement. La réalisation de la phase 1 nécessitait dans un premier temps d'identifier les acteurs à rencontrer. L'engagement de ceux-ci est rapporté dans les paragraphes suivants, alors que les contributions des acteurs aux phases 2 à 5 sont rapportées dans les chapitres 3 à 7 et discutées dans le chapitre 8.

2.2. Identification des acteurs camarguais (Phase 1)

Le choix des acteurs est un élément déterminant pour la conduite d'un projet de recherche où la dimension participative est privilégiée (Neef *et al.*, 2010). Même si des acteurs peuvent rejoindre le projet en cours de route, la participation est facilitée si, dès le départ, la liste des acteurs concernés est la plus complète possible. Dans le cas de ce projet, la première liste d'acteurs a été réalisée au sein de l'équipe de recherche et soumise à Raphaël Mathevet (CEFE-CNRS), qui travaille depuis longtemps en Camargue en utilisant la modélisation d'accompagnement, ainsi qu'à Régis Vianet, directeur adjoint du Parc Naturel Régional.

Parmi les acteurs concernés par l'évolution des systèmes agricoles ou en interaction avec l'agriculture en Camargue, il est possible de distinguer au moins trois types d'acteurs : les acteurs des filières agricoles, les acteurs de la gestion du territoire et de la protection des espaces naturels, et les acteurs étatiques, dont les principaux sont décrits dans le tableau 3.1 et présentés dans les paragraphes ci-dessous.

- Les « acteurs des filières » regroupent les agriculteurs (dont la description précise des systèmes de production est détaillée dans le chapitre 4) ainsi que tous les collecteurs de céréales, transformateurs, et vendeurs d'intrants. Cinq entreprises locales collectent la totalité du riz produit, ainsi que les autres céréales et protéo-oléagineux. La coopérative Sud Céréales collecte, suivant les années, plus de 50 % du riz. Deux entreprises privées de collecte et de transformation (le Comptoir Agricole du Languedoc et le Silo de Tourtoulou) collectent environ 45 % du volume. Le reste est partagé entre de petites entreprises qui stockent et transforment à petite échelle. Deux entreprises collectent du riz biologique (BioSud et Bio-Camargue). D'après Jaeck (2010), la concentration des acteurs de la collecte permet de classer le marché du riz comme oligopolistique, dans lequel un acheteur (ici la coopérative) est en position de force par rapport aux autres. Trois entreprises (Etablissements Perret, Etablissements Esteve, et l'entreprise SCAD) se partagent la majorité du marché des intrants (fertilisants, semences, produits phytosanitaires). L'ensemble des agriculteurs et des acteurs de la filière rizicole sont regroupés au sein du Syndicat des Riziculteurs de France et Filières, depuis la création de l'IGP au début des années 2000. Ce syndicat, qui est traditionnellement présidé par un agriculteur, est donc un acteur important de l'agriculture camarguaise, puisqu'il assure la défense des intérêts de la filière rizicole ainsi que la promotion de l'IGP « Riz de Camargue ».

Tableau 3.1 : Description des principaux acteurs intervenants sur le territoire camarguais.

Type d'acteur	Activités	Ressources ou produits gérés	Nom de l'acteur
Filières	Syndicalisme	Production et transformation du riz	Syndicat des Riziculteurs de France et Filières
	Vente d'intrants	Intrants (fertilisants et pesticides)	Etablissement Perret
			Etablissement Esteve
			Société Commerciale Agricole de Distribution
	Collecte des productions agricoles	Toutes céréales et oléo protéagineux	Coopérative Sud céréales
		Toutes céréales et oléo protéagineux, conventionnels et certifiés en AB	Comptoir Agricole du Languedoc
		Riz conventionnel	Silo de Tourtoulou
		Toutes céréales et oléo protéagineux, certifiés en AB	Bio Sud
		Riz biologique	SAS BioCamargue
	Transformation du riz	Riz	Rizerie Sud Céréales Soufflet SAS
Comptoir Agricole du Languedoc			
Silo de Tourtoulou			
Gestion du territoire et protection de l'environnement	Protection de l'environnement	Etang de Vaccarès, Etangs Inférieurs	Société Nationale de Protection de la Nature Réserve Nationale de Camargue
		Domaine de la Tour du Valat	La Tour du Valat - Centre de recherche pour la conservation des zones humides méditerranéennes
	Gestion du territoire	Territoire du Parc Naturel Régional de Camargue	Parc Naturel Régional de Camargue
		Territoire du SAGE de la Camargue Gardoise	Syndicat Mixte de Gestion de la Camargue Gardoise
		Périmètres d'irrigation et d'Assainissement	Associations Syndicales Autorisées
	Etatique	Développement agricole	Secteur agricole
Assistance administrative et juridique		Secteur agricole	Directions Départementale des Territoires et de la Mer, Direction Régionale de l'Agriculture et de la Forêt
Suivi des productions et marchés		Production et transformation du riz	FranceAgriMer, cellule riziculture

- Les acteurs de la gestion du territoire et de la protection des espaces naturels : la Réserve Nationale de Camargue est la plus ancienne institution. Créée au début du 20^{ème} siècle, cette réserve qui couvre près de 30 000 ha est une réserve intégrale, toutes les activités humaines étant interdites sur la zone. Dans les années 1970, le Parc Naturel Régional de Camargue (PNRC) a été créé afin de gérer la coexistence entre les activités humaines et les espaces naturels. Il représente une surface de plus de 120 000 ha et est géré par un syndicat mixte élargi qui regroupe la région PACA, le département des Bouches-du-Rhône, les communes d'Arles et de Saintes-Maries-de-la-Mer, ainsi que des établissements publics (chambre de Commerce et d'Industrie du Pays d'Arles, Chambre d'Agriculture et Chambre de Métiers des Bouches-du-Rhône). Le syndicat mixte de gestion de la Camargue Gardoise (SMCG) est quant à lui en charge des milieux naturels (Zone Natura 2000), des domaines départementaux, et du schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE), de la Camargue Gardoise. Il regroupe le département du Gard et huit communes qui sont au sein du territoire du SAGE. La Fondation de la Tour du Valat (TDV) est un centre de recherche privé qui gère près de 2 000 ha de milieux naturels et qui développe des recherches notamment sur les liens entre agriculture et milieux naturels en Camargue. Les Associations Syndicales Autorisées sont les organismes qui gèrent les infrastructures et le fonctionnement des périmètres d'irrigation et d'assainissement. La gouvernance des ASA est assurée par les agriculteurs qui la plupart du temps dirigent ces associations. Un Syndicat Mixte de Gestion des ASA est en charge de tous les aspects administratifs ainsi que de l'animation de ces ASA.

- Enfin, les acteurs que nous appelons « étatiques » regroupent différentes institutions :

- les chambres d'agriculture (du département du Gard / 30 et des Bouches du Rhône / 13) qui sont des établissements publics dédiés au développement agricole¹¹,
- les Directions Départementales des Territoires et de la Mer (30 / 13) et les Directions Régionales de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Forêt des régions Languedoc-Roussillon et Provence Alpes Côte d'Azur, qui sont les administrations locales de l'agriculture,
- FranceAgriMer, via la cellule « riziculture » de l'antenne de Volx (Alpes de Haute-Provence), est un établissement public national qui sert de « lieu d'échange et d'arbitrage entre les filières françaises de l'agriculture »¹².

¹¹ <http://www.chambres-agriculture.fr/grands-contextes/chambres-dagriculture/notre-reseau/>, consulté le 01/09/2011.

¹² <http://www.franceagrimer.fr/Projet-02/02etablissement/index21.htm>, consulté le 01/09/2011.

Ces acteurs n'agissent pas directement, la plupart du temps, sur le territoire, mais assistent les agriculteurs dans les démarches administratives et servent de relais locaux avec les institutions nationales. Ils permettent à la fois d'informer les agriculteurs des changements à venir et d'informer les institutions de la situation de l'agriculture du territoire.

De nombreux autres acteurs, notamment pour toutes les filières agricoles non-liées aux grandes cultures (e.g. vigne, maraîchage, fruitiers, élevage), ainsi que pour les autres activités, avaient initialement été identifiés. Cependant, un recentrage du projet est intervenu pendant la réalisation des premières enquêtes de terrain, du fait de la quantité de données à acquérir, analyser et mettre en forme, tout en respectant la durée du projet de trois ans. Nous avons ainsi décidé de centrer le projet sur les activités de grandes cultures et ne contacter que les acteurs identifiés pour ces activités.

2.3. Engagement des acteurs dans la démarche et acquisition d'informations pour la conception des scénarios

Cette première phase de la démarche, fortement ancrée sur le terrain, avait plusieurs objectifs, à la fois en terme de participation des acteurs et de données à acquérir. Il s'agissait : d'établir un premier contact avec les principaux acteurs du territoire, d'exposer les objectifs, étapes et résultats attendus du projet, et d'acquérir des informations sur les institutions¹³ et acteurs rencontrés. Dans un second temps, il s'agissait d'identifier les échelles, indicateurs et idées de scénarios que les acteurs jugeaient pertinents.

17 entretiens semi-structurés ont été conduits. Ceux-ci ont été réalisés entre mars et juillet 2010. L'encadré 3.1 présente la liste des acteurs rencontrés. Le guide d'entretien utilisé est présenté en annexe A.

¹³ Nous utilisons le terme « institution » pour regrouper toutes les formes de structures rencontrées : associations, fondations, syndicats, institutions publiques etc...

Encadré 3.1 : Liste des acteurs rencontrés

C. Mundler (directrice du Syndicat Mixte de la Camargue Gardoise), **C. Toutain** (chargée de missions agriculture et environnement), **C. Brochier** (Chargée de mission SIG)

P. Chauvelon (hydrologue à la Tour du Valat)

F. Callet (Président du Syndicat des Riziculteurs de France et Filières) et **B. Van de Putte** (directrice)

E. Coulet (directeur de la Réserve Nationale de Camargue)

P. Pace (directeur du Syndicat Mixte de Gestion des Associations Syndicales Autorisées)

R. Vianet (directeur adjoint du Parc Naturel Regional de Camargue), **A. Vadon** (Chargée de mission agriculture), **S. Marche** (chargée de mission eau), **P. Isenmann** (Chargé de mission SIG)

M. Thomas (directeur de la Société de collecte et stockage Thomas et de la société BioSud)

M. Nadéo (directeur de la société de fabrication d'engrais S.E.D, de la société de commercialisation d'intrants agricoles SCAD, actionnaire de la société BioSud)

M. Lacrotte (directeur des Silos de Tourtoulou, société de collecte et transformation du riz)

M. Griotto (directeur de l'usine BioCamargue de collecte et transformation de riz biologique)

E. Boy (directeur de la coopérative Sud Céréales, société actionnaire de BioSud) et **D. Villenave** (responsable de la zone de collecte Camargue chez Sud Céréales)

Les entretiens se sont déroulés dans les locaux de chaque acteur et ont duré entre 2 et 5 heures. Chaque entretien était constitué de deux phases, la première consistant en la présentation du projet et la seconde à l'acquisition d'informations pour la définition et l'évaluation des scénarios (Tableau 3.2).

La première phase consistait à créer une connaissance mutuelle des institutions. Les entretiens débutaient par une demande de présentation de l'institution en termes d'objectifs, d'actions courantes, d'organisation et de moyens matériels, humains et financiers. Un accent particulier était mis sur les collaborations avec les autres institutions du territoire ainsi que sur le type et la qualité des relations formelles ou informelles que l'acteur entretenait avec les autres acteurs que nous avons prévu de rencontrer ou qui lui semblait incontournable pour aborder notre sujet. Il s'agissait avant tout de mieux connaître l'institution, son ancrage territorial et les actions qu'elle mène en lien avec l'agriculture et l'environnement dans ce contexte territorial. Le projet « Prospective Agricole Camargue » était ensuite présenté : ses objectifs, l'équipe participant au projet, la démarche générale en quatre phases et le schéma d'interaction avec

les acteurs (figure 3.1). Puis nous exposons la nature exploratoire (et non prédictive¹⁴) des scénarios et les thèmes que nous avons pressentis. En règle générale, cette présentation suscitait de nombreuses discussions avec l'acteur rencontré. Certains d'entre eux réagissaient vivement sur l'opportunité d'explorer certains scénarios comme le développement de l'AB, alors que d'autres questions leur semblaient plus cruciales mais n'étaient pas traitées par les équipes de recherche présentes sur le terrain. Il s'agissait par exemple de l'avenir de la riziculture camarguaise dans un contexte de réforme de la Politique Agricole Commune, ou d'impasses techniques telles que la réduction des matières actives pour le désherbage du riz et le développement de résistance aux molécules existantes.

Tableau 3.2 : Etapes de l'entretien et produits pour la construction des scénarios avec les acteurs.

Phases de l'entretien	Etapes	Produits
1	Présentation de l'institution rencontrée : fonctionnement, collaborations, missions	Connaissance mutuelle Discussion de la problématique
	Présentation de l'équipe de recherche et du projet	
2	Actions de suivis et projets relatifs à l'agriculture	Echelles d'intérêts ou d'intervention actuelles Echelles pour l'évaluation des scénarios Indicateurs suivis et données disponibles
	Visions du futur de l'agriculture en Camargue	Changements pour la construction des scénarios Horizons de temps pour les scénarios
	Critères d'évaluation de l'agriculture	Pistes pour la proposition des indicateurs d'évaluation

Une seconde phase avait pour objectif de formaliser des connaissances utiles à la construction et l'évaluation des scénarios. Elle a consisté dans un premier temps à identifier les échelles spatiales et temporelles que les acteurs privilégiaient pour le suivi des processus d'évolution qui les intéressent. Certains acteurs mobilisent des indicateurs qu'ils mesurent et suivent à des échelles particulières. Par exemple, le Parc Naturel Régional de Camargue (PNRC) suit l'évolution de l'usage du sol tous les 5 ans, à l'échelle de la parcelle agricole et ce pour l'ensemble du territoire du Parc. Pour d'autres acteurs, comme le Syndicat des Riziculteurs de France et Filières (SRFF), il s'agit plutôt d'échelles d'intervention : une grande partie des actions du syndicat sont orientées vers les exploitations rizicoles mais d'autres concernent

¹⁴ Voir chapitre 1.

l'ensemble du bassin de production de riz. Si aucune échelle spatiale ne semblait prépondérante dans les propos de l'acteur rencontré, nous faisons alors des propositions parmi celles déjà identifiées avec les autres acteurs. Dans la suite de ce chapitre, nous utiliserons le terme « échelle d'intérêt » pour un acteur, en faisant référence à l'échelle spatiale ; il regroupe à la fois des échelles de suivi-évaluation et d'action-intervention.

Les acteurs étaient dans un second temps invités à exprimer leur vision des possibles évolutions des systèmes agricoles dans le territoire. Pour cette identification de scénarios, la question de l'horizon de temps dans lequel se placer pour imaginer les évolutions est cruciale. Ce choix d'horizon de temps a été partagé avec les acteurs, et discuté par rapport aux incertitudes qui existent quant aux évolutions des systèmes agricoles. En effet, les acteurs ont souvent soulevé la question de l'horizon de temps auquel nous souhaitions construire et évaluer des scénarios, du fait que plus cet horizon est grand, et plus il existe de l'incertitude sur un grand nombre de facteurs (par exemple, évolutions des techniques de culture, ou du contexte réglementaire et économique). Les acteurs ont proposé d'utiliser un horizon de temps de 5 à 10 ans, aller au-delà leur semblant irréaliste. En conséquence, deux étapes étaient conduites pour l'identification de leurs visions :

- Dans un premier temps, les acteurs n'étaient pas contraints et pouvaient imaginer des évolutions à très long terme, s'ils le souhaitaient.
- Dans un second temps, ils étaient invités à imaginer des scénarios à court / moyen terme (5 à 10 ans), dans les cas où ils ne se seraient pas d'emblée situés dans ce cas de figure.

Ils étaient encouragés à réfléchir aux changements possibles selon trois critères : (i) ceux qu'ils pensaient les plus probables, (ii) ceux qu'ils souhaitaient voir se réaliser et (iii) ceux qu'ils ne souhaitaient pas voir émerger. Les transformations envisagées étaient classées selon trois axes différenciant par la nature du changement et son caractère exogène ou endogène par rapport au système étudié, et a contribué à la caractérisation des systèmes (rapportée au chapitre 4).

- Les changements de contexte socio-économique (changements exogènes au système) : par exemple, changement de prix des produits agricoles, du carburant, du régime de subvention...
- Les changements de systèmes techniques (alternatives aux systèmes agricoles actuels, changements endogènes au système) : conversion à l'AB, agriculture de conservation, cultures associées...

- Les changements d'objectifs pour l'agriculture du territoire (changements endogènes au système) : nouveaux objectifs pour les systèmes agricoles du territoire, comme réduire les externalités sur l'environnement, générer des emplois, développer des circuits courts de commercialisation...

Dans une dernière partie, nous leur proposons d'identifier les critères¹⁵ et les éventuels indicateurs¹⁶ qu'ils souhaiteraient avoir à disposition pour évaluer de manière quantitative les scénarios, aux échelles d'intérêts qui sont les leurs.

Ces critères pouvaient être semblables à ceux qu'ils utilisent aujourd'hui, mais pouvaient également être différents puisqu'ils visaient à évaluer des scénarios sur la base de questions nouvelles et dont les bases avaient été identifiées précédemment. Dans certains cas, les acteurs pouvaient déjà disposer de critères et d'indicateurs qu'ils suivent pour certains processus, comme par exemple dans le cas de l'évolution de l'usage du sol où un indicateur est l'évolution de la surface cultivée en riz.

Il est évident qu'il n'était pas possible d'identifier des indicateurs aisément calculables pour tous les critères jugés pertinents par les acteurs du fait (i) du manque de connaissances ou de données sur certains processus ou (ii) de la fiabilité des données existantes. Deux exemples à titre d'illustration :

- la Réserve Nationale de Camargue souhaitait un indicateur concernant l'impact des activités agricoles sur le critère dynamique des populations d'oiseaux. Les connaissances existantes entre pratiques agricoles et populations aviaires sont beaucoup trop fragmentaires. Ceci nous a conduits à questionner l'acteur pour mieux comprendre ses préoccupations et les mécanismes généraux à l'œuvre puis à proposer des indicateurs de pratiques agricoles qui permettent à l'acteur, via son expertise, d'approcher les conséquences possibles sur les populations d'oiseaux. Dans ce cas, c'est l'indicateur « surface irriguée » qui a été retenu ;
- le directeur du SMGASA qui travaille à la gestion des ASA a exposé, lors du premier entretien, qu'il ne pensait pas que les données disponibles en Camargue sur les flux d'eau ne soient suffisamment fiables pour que des indicateurs raisonnables puissent être simulés. Ces flux sont particulièrement complexes et variables d'une année sur

¹⁵ Un critère est une déclinaison par les acteurs de leur perception de chaque domaine de la durabilité (exemple « la performance » pour le domaine économique) en quelques composantes.

¹⁶ Un indicateur d'évaluation est une variable qui renseigne suffisamment sur un critère pour pouvoir comparer des systèmes (par exemple le bénéfice net de l'exploitation pour le cas précédent).

l'autre, en fonction du périmètre d'irrigation concerné, et de la répartition des parcelles de riz dans ce périmètre. Les données concernant ces flux datent des années 90 et n'ont été acquises que sur un périmètre alors qu'il en existe plus d'une dizaine, le matériel et la structure des réseaux d'irrigation a pu évoluer depuis. Même s'il souhaitait disposer d'un indicateur de quantité d'eau utilisée pour évaluer les scénarios, cet acteur mettait donc en doute la possibilité d'avoir une marge d'erreur inférieure à la variation de l'indicateur entre les différents scénarios. Cet indicateur a finalement été calculé de manière très simple, en considérant une quantité d'eau constante par hectare de riz. Cependant, du fait de la simplicité de son calcul, les acteurs ne l'ont pas utilisé et aucun résultat n'a été décrit à l'aide de cet indicateur.

2.4. Choix des indicateurs à calculer à partir des simulations

A partir de la liste des critères et indicateurs souhaités par les acteurs, une liste d'indicateurs à calculer et à implémenter dans les modèles a été proposée aux acteurs. La priorisation entre les indicateurs à calculer, et le choix de ceux pour lesquels des données allaient être collectées et analysées, ont été réalisés avec les acteurs au cours de réunions portant sur la mise à disposition de leurs données.

Le choix final des indicateurs a été conduit au regard des caractéristiques qui rendent ceux-ci performants pour évaluer un scénario (Harger *et al.*, 1996; Masera *et al.*, 1999) :

- ils doivent être sensibles aux changements étudiés : la valeur de l'indicateur doit varier de manière significative entre les différents scénarios ;
- ils doivent être applicables à l'ensemble des systèmes et scénarios étudiés : par exemple, un indicateur portant sur les systèmes d'élevages, comme la valeur fourragère, n'aurait pas d'intérêt pour évaluer des scénarios portant sur des changements de systèmes rizicoles.
- ils doivent être calculables : le coût d'acquisition des données nécessaires à leur calcul doit demeurer raisonnable. Certains indicateurs sont plus importants que d'autres pour les acteurs et peuvent justifier des coûts d'acquisition supérieurs ;
- ils doivent être fiables et compréhensibles par les acteurs : ils doivent rendre compte de manière fidèle des variations que l'on cherche à mesurer (direction, gamme de variation) et les acteurs doivent pouvoir saisir leur construction et être capable d'interpréter les valeurs pour les différents scénarios.

Des indicateurs de pratiques ont souvent été préférés à des indicateurs d'impacts (Wery *et al.*, 2011) du fait de la difficulté de calculer ces derniers dans des scénarios (ils demandent une

connaissance fine des processus en jeu). L'objectif n'est pas d'obtenir une liste exhaustive de tous les indicateurs possibles et calculables, mais il est important de s'assurer que les principaux points critiques de l'analyse des systèmes sont représentés (Lopez Ridaura *et al.*, 2002). Par exemple, les flux d'eau en Camargue sont un processus majeur en lien avec les systèmes agricoles ; il est donc indispensable d'avoir un indicateur permettant d'évaluer l'impact des scénarios sur ces flux d'eau. Pour pouvoir identifier les processus importants pour le choix des indicateurs, il faut au préalable formaliser les systèmes agricoles camarguais, ce travail étant rapporté dans le chapitre 4.

3. Résultats de la phase 1 : engagement des acteurs

3.1. Identification des échelles spatiales et temporelles

Les entretiens avec les membres des différentes institutions évoquées ci-dessus nous ont permis d'identifier les échelles d'intérêts des acteurs. Celles-ci sont exposées dans le tableau 3.3. L'échelle de l'exploitation agricole apparaît essentielle pour la mise en œuvre de nouveaux systèmes agricoles : c'est une échelle à laquelle tous les acteurs (sans exception) souhaitent disposer d'indicateurs. L'échelle du territoire (qui correspond à l'ensemble du delta de la Camargue) est également pertinente pour une majorité d'acteurs des filières et de la gestion et protection du territoire. Enfin, des échelles intermédiaires, telles que les périmètres de certaines ASA (Fumemorte, Roquemaure, Camargue Corrège Majeur notamment, voir chapitre 4), et les sous-régions (Camargue Gardoise, Grande Camargue et Plan du Bourg, voir chapitre 4), apparaissent pertinentes à certains acteurs pour le calcul d'indicateurs.

La question du temps est abordée par la définition du pas-de-temps auquel nous souhaitons décrire les processus, et de l'horizon de temps des scénarios. Cette dernière, déjà rapportée précédemment a été discutée avec les acteurs et l'horizon fixé entre 5 et 10 ans. En ce qui concerne le pas-de-temps, nous avons choisi de travailler avec un pas de un an, ce qui correspond à la périodicité des prises de décisions en termes d'assolement à l'échelle de l'exploitation, qui est le niveau de suivi le plus fin auquel les acteurs souhaitaient avoir des indicateurs calculés.

Tableau 3.3. Principaux acteurs concernés par les changements agricoles en Camargue, ainsi que leurs échelles d'intérêts.

Acteurs	Echelles
Agriculteurs	Exploitation, îlot de culture, parcelle
Associations Syndicales Autorisées et syndicat mixte des associations syndicales autorisées	Périmètre d'irrigation et/ ou d'assainissement
Parc Naturel Régional de Camargue	Grande Camargue et Plan du Bourg, ASA de Camargue Corrège Majeur et de Fumemortes
Syndicat Mixte de Gestion de la Camargue Gardoise	Camargue Gardoise
Centre de recherche de la Tour du Valat	Territoire de la Tour du Valat, Grande Camargue
Réserve Nationale de Camargue	Périmètre autour de l'étang du Vaccarès (Grande Camargue), ASA de Fumemortes et Roquemaure
Coopérative et négociants (5 différents)	Territoire (Réserve de Biosphère), voir plus large
Vendeurs d'intrants (2 différents)	Territoire (Réserve de Biosphère, voir plus large)
Syndicat des Riziculteurs de France et Filières	Territoire (Réserve de Biosphère)

3.2. Changements identifiés pour l'évolution de l'agriculture camarguaise

Formuler des hypothèses d'évolution des systèmes agricoles s'est avéré un exercice pour lequel tous les acteurs n'ont pas les mêmes prédispositions.

- Les acteurs des filières ont l'habitude de mener des réflexions prospectives qui leur servent de base pour décider notamment de leurs stratégies et investissements. Or, dans des situations de concurrence entre différentes entreprises faisant le même métier, ces informations sont très sensibles. La plupart du temps, ces acteurs n'ont pas voulu dévoiler leurs visions de l'avenir et en particulier la façon dont ils pensaient s'adapter à des transformations de leur environnement. Ils ont cependant accepté de préciser les changements du contexte socio-économique qu'ils estiment avoir les effets les plus importants sur l'agriculture camarguaise à 5-10 ans, ainsi que les changements de systèmes techniques et d'objectifs pour l'agriculture du territoire qui leur semblaient pertinents à considérer.
- Les acteurs de la « gestion » du territoire, dont les activités sont principalement liées au suivi et à la protection des espaces naturels, ne sont pas toujours très au fait du fonctionnement des systèmes agricoles et des dynamiques en cours dans le secteur de l'agriculture. De par leur position, les alternatives ou scénarios d'évolution agricole pour

le territoire sont liés à des questionnements sur l'interface entre agriculture et espaces naturels, voire entre agriculture et autres activités économiques. Néanmoins, dans le cas de la Camargue, il apparaît que leur préoccupation principale par rapport à l'agriculture est le maintien de cette activité sur le territoire et donc sa rentabilité ; ceci, bien qu'ils aspirent à une réduction des impacts négatifs (pollution, paysage...) de cette agriculture sur les espaces naturels. En effet, l'agriculture est l'une des principales activités économiques du territoire, et joue donc un rôle majeur dans sa mise en valeur, ce qui explique l'intérêt des acteurs pour cette activité.

Le tableau 3.4 reprend les principaux changements envisagés par les différents acteurs à trois échelles (parcelle, exploitation et territoire). La position des acteurs par rapport à ces changements peut-être positive ou négative, c'est-à-dire qu'il peut s'agir d'un changement qu'ils souhaitent ou au contraire qu'ils craignent. Par exemple, le développement du maraîchage intensif est unanimement craint par les acteurs rencontrés, le maintien de la culture du riz en Camargue est unanimement souhaité, alors que l'intégralité de la Camargue en AB est un changement qui ne fait pas l'unanimité parmi les acteurs rencontrés.

Tableau 3.4 : Principaux changements envisagés par les acteurs pour l'évolution du territoire.

Acteurs	Echelles	Changements envisagés		
		Endogènes (En) ou exogènes (Ex) au système	Craints (C), neutre (N) ou souhaités (S)	Détails du changement
Réserve nationale, Vendeurs intrants	Parcelle	En	S	Semis à sec du riz
Réserve nationale	Parcelle	En	S	Développement de la riziculture biologique
Réserve nationale	Parcelle	En	S	Mise en eau hivernale pour les oiseaux sur terres basses
Réserve nationale	Parcelle	En	S	Utilisation des friches pour pâturage extensif
SRFF	Parcelle	En	N	Orge, blé-dur et triticales en culture d'hiver
Négociant / rizier	Parcelle	En	N	Insertion de plus de légumineuses dans les rotations
Vendeurs intrants	Parcelle	En	N	Nouvelles rotations
Vendeurs intrants	Parcelle	En	S	Semis à sec du riz sur les terres hautes
SRFF	Exploitation	En	N	Complémentarité céréalicultures / élevage
Réserve nationale	Territoire	En	S	Configuration idéale : aménagement pour la chasse des terres basses, élevage sur les terres intermédiaires, riziculture sur les zones peu salées et agriculture classique sur les terres hautes
PNRC	Territoire	En	S	Amélioration de la qualité de l'eau
PNRC	Territoire	En	S	Maintien d'une activité agricole viable
TDV	Territoire	En	C	Développement du maraîchage intensif
TDV	Territoire	En	S	Diminution de la consommation d'intrants
TDV	Territoire	Ex	S	Renforcement de l'éco-conditionnalité des aides
SRFF	Territoire	En	C	Toute la Camargue en AB
SRFF	Territoire	Ex	C	Réduction des aides publiques, réforme de la PAC
SMGASA	Territoire	En	N	Païement de l'eau au volume consommé
Négociant / rizier	Territoire	En	S	Maintien d'une agriculture rentable
Négociant / rizier	Territoire	Ex	C	Diminution de l'aide couplée au riz
Négociant / rizier	Territoire	Ex et En	N	Plusieurs scénarios d'évolution des prix
Négociant / rizier	Territoire	En	C	Diminution des surfaces cultivées et augmentation des fourrages

Cette liste de changements possibles nous a permis d'avoir une première idée des visions des acteurs en ce qui concerne l'avenir de l'agriculture en Camargue. Elle nous a permis de déclencher une première phase d'identification des données à collecter et connaissances à mobiliser, et de nous orienter vers une meilleure appréhension de certains changements de contexte socio-économique. Cette liste a été retravaillée pour définir les scénarios à simuler lors de l'étape 4 de la démarche (Chapitre 6 et 7).

3.3. Critères et indicateurs pour évaluer les scénarios

La définition de critères pour l'évaluation des scénarios s'est révélée un exercice plus ou moins facile selon les acteurs. Le tableau 3.5 présente l'ensemble des critères et éventuels indicateurs souhaités par les acteurs pour évaluer les scénarios.

Ces critères concernent principalement trois fonctions (ou services écosystémiques) et/ou externalités de l'activité agricole : (i) la production de valeur (notamment traduite en indicateurs de valeur ajoutée des exploitations agricoles, de valeur de la production, de volumes à collecter...), (ii) les impacts environnementaux via les liens entre agriculture et gestion de l'eau (fréquences d'irrigation, quantité et qualité) et entre agriculture et habitats pour des espèces faunistiques particulières (surface de prairie, surface en bio...) et (iii) la dimension culturelle et/ou touristique via des indicateurs liés aux types d'élevage, à la chasse ou aux autres activités culturelles et économiques telles que la récolte des roseaux, l'accueil à la ferme ou les sports taurins.

Tableau 3.5 : Critères souhaités par les acteurs pour évaluer les scénarios, ainsi que les échelles où des indicateurs seraient calculés.

Acteurs	Echelles	Critères (et indicateurs) souhaités
Réserve nationale, PNRC	Territoire, Territoire du PNRC	Quantité d'eau
Réserve nationale, PNRC	Territoire, Territoire du PNRC	Qualité de l'eau par rapport aux flux de nutriment
Réserve nationale, PNRC	Territoire, Territoire du PNRC, Exploitation	Qualité de l'eau par rapport aux pesticides
PNRC	Territoire, Territoire du PNRC	Evolution des surfaces en espaces naturels et milieux cultivés
PNRC	Territoire, Territoire du PNRC	Evolution des surfaces en agriculture conventionnelle et biologique
PNRC	Territoire, Territoire du PNRC	Evolution des surfaces irriguées et non irriguées
PNRC	Territoire, Territoire du PNRC	Consommation d'énergie
PNRC, TDV	Territoire, Territoire du PNRC	Evolution des troupeaux de bovins de chaque race, et des troupeaux équins
PNRC	Territoire, Territoire du PNRC	Evolution du nombre d'éleveurs en agriculture biologique et conventionnelle dans l'AOP
PNRC, vendeur intrants	Exploitation	« Santé économique des exploitations »
PNRC	Exploitation	Rôle des subventions dans la rentabilité économique des exploitations
PNRC	Exploitation	Rôle des activités agricoles dans la rentabilité des exploitations (vs tourisme, chasse...)
PNRC	Exploitation	Emplois agricoles générés par l'agriculture
PNRC, TDV	Exploitation	Pression de pâturage exercée par les troupeaux
PNR	Exploitation	Fertilisations et amendements réalisés (et part des boues d'épurations)
PNR	Exploitation	Structure du foncier et morcellement des exploitations
PNR	Territoire	Evolution de l'usage du sol
PNR	Territoire	Localisation des cultures
SRFF	Parcelle	Coût de production
SRFF	Exploitation	Marge nette
SRFF	Exploitation	Marge brute avec main d'œuvre
SRFF	Exploitation	Rendement sur consommation d'énergie
SRFF	Territoire	Bilan carbone
SMCG	Territoire du SMCG	Surface de milieux naturels pâturés
SMGASA	Parcelle	Niveau haut et niveau bas de consommation d'eau par ha
SMGASA	Parcelle	Consommation d'eau en fonction des types de sols
SMGASA	Exploitation	Coût de l'eau
SMGASA	Parcelle	Salinité des sols en fonction des volumes d'eau
Négociant rizier	Territoire	Prix du riz biologique
Négociant rizier	Territoire	Evolution des surfaces en AB
Négociant rizier	Territoire	Prix seuil des productions pour une rentabilité correcte
Négociant rizier	Territoire	Volume de chaque culture à collecter
Vendeurs intrants	Territoire	Surface par culture

Comme mentionné dans le paragraphe 2.3, il n'a pas toujours été possible d'identifier des indicateurs facilement calculables pour chacun des critères souhaités par les acteurs, car certains nécessitent d'avoir accès à des informations non aisément disponibles.

Par exemple, la définition d'indicateurs sur l'évolution des activités d'élevage dans les exploitations, nécessiterait de réaliser un diagnostic pour mieux connaître la situation actuelle et la diversité des activités intra-exploitation et inter-exploitation. De plus, l'objectif de ce travail étant d'évaluer différents scénarios d'évolution des systèmes agricoles, avec un centrage sur la façon de produire les grandes cultures, aucun indicateur portant sur les autres activités des exploitations et du territoire n'a été défini.

Des indicateurs ont donc été proposés aux acteurs en lien avec les critères qu'ils souhaitaient. Le tableau 3.6 présente les indicateurs finalement retenus pour évaluer les scénarios.

Tableau 3.6 : Indicateurs retenus pour l'évaluation des scénarios et implémentés dans les modèles (voir chapitre 6 et 7).

L'îlot correspond à un groupe de parcelle. Quand il y a plusieurs échelles, cela signifie que l'indicateur mentionné est calculé à chaque échelle. (su : sans unité.)

Echelle(s)	Critère indiqué	Indicateur
Ilot	Performance économique	Marge brute par îlot (€.ha ⁻¹)
	Performance agronomique	Rendement par îlot (t.ha ⁻¹)
Exploitation	Performance économique	Coûts de production (€)
		Marge brute (€)
		Marge brute moyenne par ha (€.ha ⁻¹)
		Marge brute avec aides (€)
		Marge brute moyenne avec aides par ha (€.ha ⁻¹)
		Dépendance aux intrants
	Rôle des subventions dans la performance économique	Part des aides dans la marge (su)
	Main d'œuvre	Temps de travail total sur un an (h)
	Evolution des surfaces en agriculture conventionnelle et biologique	Surface en agriculture biologique (ha)
		Proportion de la surface en agriculture biologique (%)
	Organisation du travail	Temps de travail par quinzaine de jours (h.ha ⁻¹)
	Performance agronomique	Rendement moyen par culture en conventionnel et biologique (t.ha ⁻¹)
Exploitation, sous-région et Territoire	Rôle des subventions dans la performance économique	Montant des subventions perçues (€)
	Qualité de l'eau par rapport aux pesticides	Indice de Fréquence des traitements (su)
	Evolution des surfaces en agriculture conventionnelle et biologique	Surface par culture en conventionnel et biologique (ha)
	Volume de chaque culture à collecter	Production par culture en conventionnel et biologique (t)
	Evolution de l'usage du sol	Surface de chaque culture (ha)
Sous-région et Territoire	Performance économique de l'activité agricole	Valeur de la production régionale (€)
	Evolution des surfaces en agriculture conventionnelle et biologique	Proportion de la surface en agriculture biologique (%)
	Evolution des surfaces irriguées et non irriguées	Pourcentage de la surface en riziculture irriguée (ha)
	Quantité d'eau	Quantité d'eau utilisée pour l'irrigation (m ³)
	Emplois agricoles générés par l'agriculture	Nombre d'unité de travail humain

4. Apports et limites de la phase 1 de la démarche et choix d'orientations stratégiques pour l'évaluation de scénarios

Le choix des acteurs à associer au début de la démarche est un exercice à la fois clé et difficile. Clé, car c'est en présentant un projet à son début que l'on peut réellement proposer aux acteurs d'en modifier certains aspects pour en faire de véritables partenaires (par exemple modification des scénarios à évaluer, ajouts d'indicateurs ou modification de la manière de les calculer). Difficile, car le risque est également qu'une discussion de ces différents éléments de définition et de réalisation du projet avec un nombre important d'acteurs, amène soit à une orientation trop forte des travaux vers les objectifs d'un acteur particulier, ou à l'inverse à l'impossibilité d'identifier des objectifs sur lesquels tout le monde puisse s'accorder. Ces enjeux nous ont conduits à travailler, dans la majeure partie de ce projet, individuellement avec chaque acteur, sur les scénarios qui leur semblaient les plus pertinents, pour éviter des confrontations entre acteurs qui auraient pu porter préjudices au processus de construction et d'évaluation de scénario.

Travailler avec les acteurs nécessite donc de connaître les rapports de force existant entre eux. Même si nous n'avons pas réalisé de véritable analyse des interactions et des réseaux d'acteurs (Degenne *et al.*, 2004), nous avons essayé de comprendre comment ils interagissent entre eux. Ceci avait pour but d'éviter le risque de brusquer des sensibilités, par exemple en évoquant sans discernement des sujets sensibles pour certains types d'acteurs ou en proposant d'inviter à une même réunion, des acteurs notoirement en conflit. De plus, cette compréhension des relations (de conflits ou de coopération) entre acteurs permet, de mieux comprendre la situation actuelle du territoire et ses développements possibles.

Les acteurs des filières sont les plus concernés par les évolutions des systèmes agricoles, et sont également ceux qui ont le plus de connaissances sur ces systèmes. Les acteurs de la gestion et protection du territoire sont intéressés par l'évolution de l'agriculture en Camargue mais leurs activités n'étant pas liées économiquement aux activités agricoles, ils sont forcément moins préoccupés par l'évolution économique du secteur. Ils sont par contre intéressés par toute formalisation des connaissances sur les systèmes agricoles (typologies, d'exploitations agricoles, rentabilité et coûts de production...). De fait, il existe actuellement une dissymétrie d'information entre les acteurs, ceux des filières étant plus au fait des questions agricoles que ceux de la gestion et de la protection du territoire et inversement pour les questions liées aux espaces naturels.

Les deux principales échelles d'intérêts des acteurs sont celle de l'exploitation et celle du territoire, dont les limites sont celles définies par la Réserve de Biosphère. L'échelle de l'exploitation reste centrale pour comprendre les choix d'assolements ainsi que les choix de techniques culturales (niveau d'intrants, mode de conduite), alors que l'échelle du territoire permet de concevoir des indicateurs de bassin d'approvisionnement en produits agricoles, d'emploi régional, ainsi que des indicateurs d'impacts environnementaux.

Différents indicateurs ont ainsi été identifiés à partir des intérêts des acteurs et adaptés aux données qu'il nous semblait possible d'acquérir. Les indicateurs ont été choisis par rapport aux critères rapportés dans la partie 2.3, tout en considérant également la cohérence du groupe d'indicateurs pour évaluer les scénarios : il importait d'obtenir des indicateurs relatifs aux différents piliers et attributs de la durabilité des systèmes (Lopez Ridaura *et al.*, 2005).

L'objectif de cette thèse, avant tout méthodologique, nécessitait pour sa réalisation que les acteurs s'impliquent et participent ; il était donc nécessaire de travailler sur des types de scénarios d'évolution qui les intéressent et, si possible, préoccupent une majorité d'acteurs. Un sujet tel que la réduction de l'usage des produits phytosanitaires, par exemple, était considéré comme prioritaire pour un acteur mais comme sujet non pertinent pour d'autres. Choisir de mettre en avant ce thème aurait conduit une partie des acteurs à se désintéresser du projet, ce qui n'aurait pas permis de créer des conditions d'échanges et de « négociation » entre les acteurs concernés par l'évolution du secteur agricole en Camargue. La définition de la problématique de terrain, au travers du choix des scénarios à évaluer, s'est donc avérée cruciale par rapport à l'engagement des acteurs dans le projet. Une multitude de scénarios d'évolution de l'agriculture en Camargue auraient ainsi pu être évalués et servir de base au test de la méthodologie que nous proposons, à la condition qu'ils remplissent a minima les conditions suivantes :

- les connaissances nécessaires à leur construction et évaluation sont disponibles et accessibles ;
- les scénarios mobilisent une majorité d'acteurs ;
- les scénarios posent des questions à des échelles multiples.

D'autres réunions et confrontations avec les acteurs, conduites notamment pour la construction de la typologie des exploitations et pour la quantification des activités (étapes 2 et 3 de la figure 3.1, voir chapitres 4 et 5 de cette thèse), ainsi que des interactions répétées

avec le SRFF ont conduit à définir le premier scénario qui concerne l'évolution (prévue pour 2013) des systèmes de soutien de la politique agricole commune (voir chapitre 6). Ce thème a été mentionné par plusieurs acteurs rencontrés dans l'étape 1 de la démarche. Une partie des autres scénarios proposés par les acteurs ont été évalués en utilisant un modèle bioéconomique (chapitre 7) : évolution des prix des productions, développement de l'AB correspondant aux objectifs du Grenelle de l'environnement (20 % des surfaces en agriculture bio en 2020), réduction des indices de fréquence des traitements.

Synthèse partielle

Ce chapitre a permis de présenter comment les acteurs des systèmes agricoles céréaliers camarguais ont été identifiés et engagés dans une démarche de construction et d'évaluation de scénarios. Cette phase d'engagement a permis de définir les scénarios à évaluer ainsi que de choisir les indicateurs à calculer aux différentes échelles d'intérêt. Le choix des acteurs a facilité la caractérisation des systèmes agricoles camarguais (chapitre 4) ainsi que l'acquisition de données sur ces systèmes (chapitre 5).

Chapitre 4 : Caractérisation des systèmes céréaliers camarguais à de multiples échelles

Dans le chapitre 3, nous avons présenté quelques éléments de caractérisation des systèmes, à travers les perceptions qu'en ont les acteurs, et qui déterminent des échelles, critères et indicateurs à prendre en considération. Cependant, il est nécessaire de mieux formaliser les systèmes étudiés aux différentes échelles jugées pertinentes, afin de réaliser les changements d'échelles au cours du processus d'évaluation. A partir des éléments donnés dans le chapitre 3, nous avons réalisé cette caractérisation aux échelles de la parcelle (§1), de l'exploitation agricole (§2) et de la région (le territoire camarguais) et de sous-ensembles de ce territoire (périmètre d'ASA, régions administratives, sous-régions au sens biophysique) (§3).

1. Echelle de la parcelle : définition des activités

Dans les systèmes agricoles, une activité est définie comme une séquence cohérente d'opérations techniques qui se traduisent par la production de biens commercialisables (par exemple des grains de céréales) et/ou utilisables au sein d'une exploitation (par exemple des fourrages), ainsi qu'à des externalités (par exemple, des nitrates lixiviés) (Hengsdijk *et al.*, 1999). Chaque activité est caractérisée par des coefficients techniques qui spécifient la contribution de celle-ci à la réalisation d'objectifs multiples (Hengsdijk *et al.*, 2003). Dans cette partie, nous présentons les critères de définition des activités, leur quantification en coefficients techniques étant réalisée dans le chapitre 5.

Le choix des critères de définition des activités est étroitement lié au degré de détail à la fois nécessaire et possible pour caractériser celles-ci. Le degré de détail nécessaire est déterminé par les connaissances existantes sur les facteurs faisant varier les pratiques culturales et les rendements des cultures. Ils ont, dans un premier temps, été identifiés à dire d'expert, puis l'information disponible a contraint leur choix final. Les critères finalement retenus, et détaillés dans les parties suivantes, sont: les cultures, les types de sol, les précédents culturaux, les modes de conduite et les niveaux d'intrants (Tableau 4.1).

Différentes espèces sont actuellement cultivées en Camargue, qu'il convient donc de détailler : quelques cultures couvrent de grandes surfaces, d'autres ont été présentes ou sont pressenties comme potentiellement cultivables par les agriculteurs, notamment si les rapports de rentabilité entre celles-ci venaient à changer. En Camargue, il est couramment admis que

les contraintes pédo-hydrologiques ont un impact fort sur les décisions des exploitants en termes de choix et de conduite des cultures. En effet, les performances agronomiques des cultures dépendent notamment de deux facteurs naturels :

- La nature du sol, plus ou moins argileuse et riche en matières organiques, a un impact sur la capacité de rétention de l'eau du sol et sur la fourniture d'éléments minéraux et donc sur la croissance des plantes et les performances des cultures.
- « L'altitude » des terres a un impact sur (i) les phénomènes d'hydromorphie lors des épisodes pluvieux automnaux et hivernaux, pouvant causer la mortalité de plantes et (ii) sur les phénomènes de salinisation des terres (Mouret, 1988). Les remontées de sel des nappes phréatiques, conséquence d'un déficit entre pluie et évapotranspiration, peuvent provoquer des dommages sur les plantes et impacter de manière non négligeable le rendement. Les terres basses sont les plus proches des nappes phréatiques de surface (salées) et sont donc plus assujetties à cette remontée du sel.

Les performances ainsi que les pratiques culturales dépendent également des précédents culturaux :

- Tous les couples précédents/suivants en termes de succession culturale ne sont pas possibles, notamment pour des raisons d'incompatibilité de date de récolte et de date de semis, ou d'état de la parcelle (par exemple, il est difficile de semer un blé-dur après un riz sur un sol bas).
- Les itinéraires techniques peuvent être différents en fonction du précédent cultural (date de semis, fertilisation...): par exemple, après une culture de luzerne, les agriculteurs ont tendance à réduire les doses d'engrais azotés apportées.
- Les niveaux de rendements peuvent être impactés par la culture précédente : par exemple, le rendement d'un blé après un blé est moins bon qu'après un riz, notamment du fait de la pression des adventices difficile à contenir en monoculture, même avec des herbicides.

Deux principaux modes de conduite ont été considérés dans cette étude, étant les deux plus communs à la Camargue. Le mode dit « conventionnel » correspond aux pratiques les plus courantes en Camargue, et fait la plupart du temps usage d'intrants de synthèse (pesticides et engrais). Le second mode de conduite considéré est l'agriculture biologique. Ce système est considéré comme une alternative crédible au mode conventionnel, et est déjà pratiqué en Camargue sur une surface non négligeable.

Deux niveaux d'intrants ont été définis, sur la base de l'analyse des itinéraires techniques pratiqués en Camargue (voir Chapitre 5). Le niveau dit « intensif » correspond à un usage

important d'intrants, le niveau dit « simplifié » correspond à un usage réduit. Par exemple, dans le cas des systèmes rizicoles, certaines parcelles font l'objet de faux-semis suivis de désherbage chimique, associant souvent deux molécules différentes d'herbicide, tandis que d'autres sont semées directement après des opérations de travail du sol. Les intrants utilisés pour un niveau d'intrants donné (« intensif » ou « simplifié ») peuvent également varier pour une culture donnée en fonction du précédent cultural.

Tableau 4.1 : Description des valeurs possibles des cinq critères de définition de l'activité agricole.

L'ensemble des possibilités définit 1600 activités théoriques.

Critère	Nombre de valeurs	Description des valeurs
Types de sol	4	(sol sableux haut, sol argilo-limoneux ou limono argileux haut, sol argilo-limoneux bas, sol salé et hydromorphe)
Cultures	10	(riz, blé-dur, luzerne, colza, tournesol, sorgho, maïs, lentille, soja, prairie)
Précédent cultural	10	(toutes les cultures)
Mode de conduite	2	(conventionnel, biologique)
Niveau d'intrants	2	(intensif, simplifié)

Dans les paragraphes suivants, nous détaillons la caractérisation de chacun de ces critères.

1.1. Les sols

Les indicateurs couramment utilisés en Camargue pour caractériser les sols sont (i) la texture, plus ou moins argileuse, qui est corrélée positivement avec le taux de matière organique (Delmotte *et al.*, 2011) et (ii) la sensibilité au sel, déterminées par la fréquence de remontées de sel sur une série d'années. Des données sur la texture des sols, précisant si ceux-ci étaient sodiques, ont été obtenues à partir de la base de données spatialisée INRA BDSOL¹⁷ pour l'ensemble du territoire de la Camargue. La pression liée au sel est cependant graduelle, et ces données ne sont pas précises quant à la sensibilité aux remontées salines. Cependant, il est

¹⁷ Lien permanent : <http://sol.ensam.inra.fr/BdSolLR/Asp/Default.asp>

couramment admis que ce facteur est étroitement lié à l'altitude des terres (Mouret, Com. Pers.). Deux sources de données ont donc été utilisées pour caractériser l'altitude des sols :

- Sur le territoire de la Camargue Gardoise, un Modèle Numérique de Terrain¹⁸ a été mis à notre disposition par le SMCG.
- Pour la Grande Camargue et le Plan du Bourg, une carte d'altitude des sols a été réalisée dans les années 1980 par le CNRS et celle-ci nous a été fournie par le PNRG.

L'annexe B décrit comment ces données ont été mises en forme et analysées pour définir quatre types de sols.

Il est couramment admis (Mouret, com. Pers) que les sols dont l'altitude est inférieure à 1.5m d'altitude sont sujets à l'hydromorphie. Ce seuil a donc été utilisé pour distinguer les terres hautes et les terres basses. En croisant ces deux sources de données, nous avons proposé une classification des types de sols, décrite dans le tableau 4.2 et spatialisée dans la figure 4.1 et en termes d'altitude, pression de sel et texture. Il s'agit des :

- Sols sableux hauts
- Sols limono-argileux et argilo-limoneux hauts
- Sols argilo-limoneux bas
- Sols sodiques et hydromorphes bas¹⁹

Tableau 4.2 : Caractéristiques des quatre types de sols cultivés en Camargue.

Type de sol	Caractéristiques		
	Altitude	Salinité	Taux d'argile
Sols sableux hauts	> +1.5 m	Faible	Faible
Sols limono-argileux et argilo-limoneux hauts	> +1.5 m	Faible	15-50%
Sols argilo-limoneux bas	[0 m ; + 1.5 m]	Moyenne	Elevé
Sols sodiques et hydromorphes bas	[-0.5 m ; + 0.5 m] Forte sensibilité à l'hydromorphie	Forte	Variable

¹⁸ Un modèle numérique de terrain est une représentation de la topographie d'un territoire. Le MNT de la Camargue Gardoise est produit par l'IGN.

¹⁹ Les traductions de ces types de sol en anglais, pour les chapitre 6 et 7 notamment, considèrent les sols hauts comme des sols profonds, et les sols bas comme des sols superficiels du fait de la présence de la nappe phréatique salée. Les traductions sont respectivement : deep sandy soil, deep loamy clay soil, shallow loamy clay soil and alluvial hydromorphic soil.

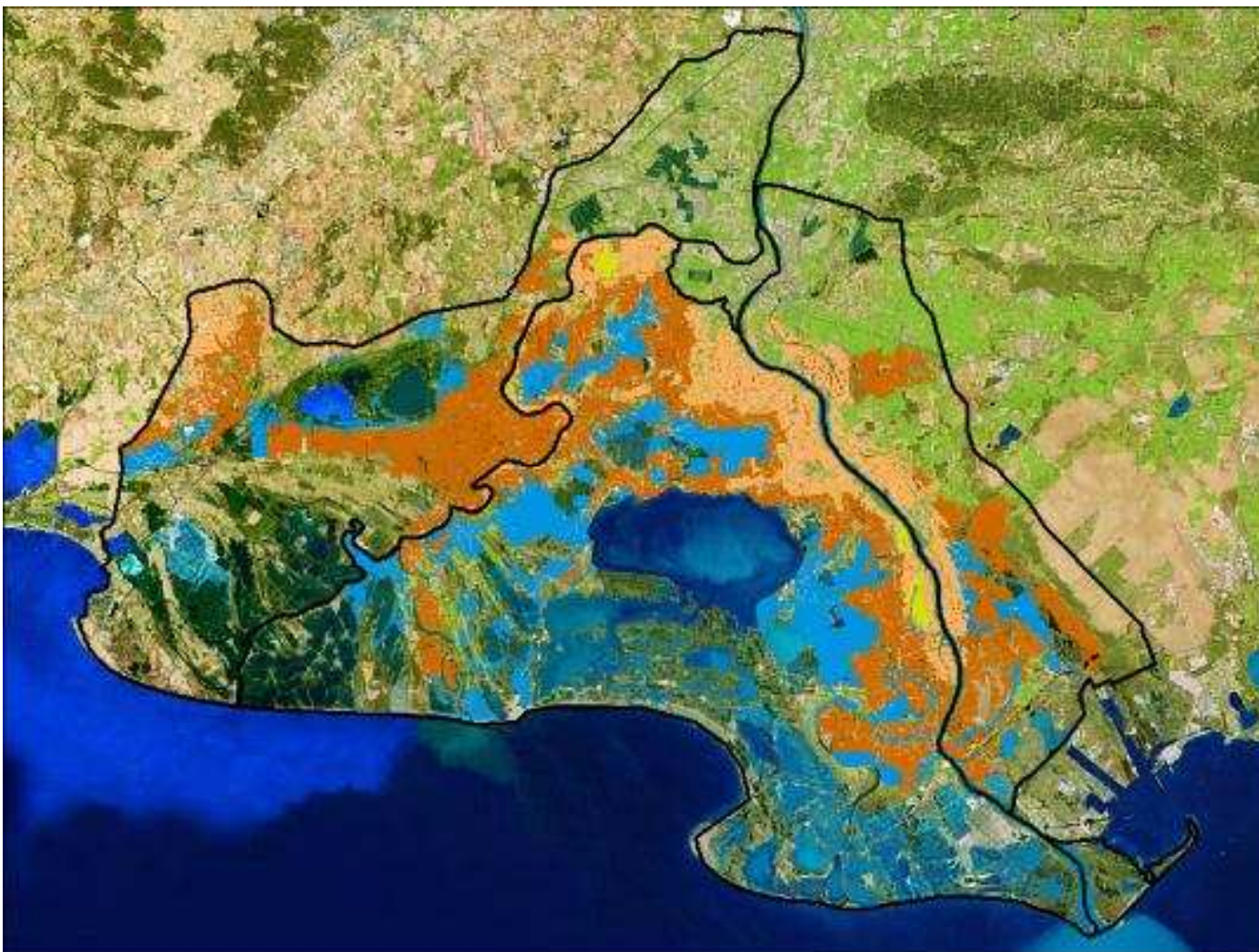


Figure 4.1 : Cartographie des sols en fonction de la classification proposée.

Quatre types de sols sont distingués : Sols limono-argileux et argilo-limoneux hauts (orange), sols sableux hauts (jaune), sols argilo-limoneux bas (marron) et sols sodiques et hydromorphes bas (bleu clair) (Sources des données : INRA, Réserve Nationale de Camargue, Parc Naturel Régional de Camargue et Syndicat Mixte de la Camargue Gardoise).

1.2. Les cultures

Une liste de cultures a été définie à partir de celles déjà présentes en Camargue, même sur des surfaces réduites (Source : base de données de l'occupation du sol en Camargue et Jean Claude Mouret, INRA).

Nous avons retenu neuf cultures (le riz, le blé-dur, la luzerne, le colza, le tournesol, le sorgho, le maïs, la lentille et le soja) auxquelles nous avons ajouté la prairie temporaire, présente dans les exploitations pratiquant l'élevage.

Le riz (*Oryza sativa*, type *japonica*) est la seule production agricole irriguée en Camargue. C'est une culture d'été, semée début mai et récoltée entre septembre et octobre. Le grand volume d'eau utilisé (environ 25 000m³ ha⁻¹) permet de lessiver le sel. De plus, l'alternance de cultures sèches et irriguées permet de diminuer la pression d'adventices pour les deux types de production, le stock de graines d'adventices du riz étant diminué par la succession de plusieurs cultures sèches, et inversement.

Les céréales, les oléo-protéagineux, et les fourrages composent les cultures sèches:

- La céréale principale est le blé-dur (*triticum turgidum* sous espèce *durum*), qui est une culture d'hiver, semée idéalement entre fin octobre et mi-novembre. Il est parfois difficile à implanter après un riz, notamment sur les sols bas. Le sol a des difficultés à se ressuyer après la récolte du riz, limitant les conditions de travail du sol et de semis du blé. Le sorgho (*Sorghum bicolor*) et le maïs (*Zea mays*) sont deux cultures de printemps, qui sont plus marginales en Camargue. En effet, du fait du vent (le mistral), le maïs a tendance à se coucher, ce qui complique sa récolte. Par ailleurs, sous ce climat, le maïs doit être irrigué (par aspersion), ce qui nécessite du matériel spécifique, et notamment la mise sous pression de l'eau. Peu d'exploitations sont équipées pour ce type d'irrigation. Le sorgho ne bénéficiait pas, au cours de la dernière décennie, de conditions économiques favorables à sa production.
- Les oléagineux présents en Camargue sont le tournesol (*Helianthus annuus*) et le colza (*Brassica napus*). Cependant, le colza est très sensible au vent à la fin du cycle, les siliques (gousses) ayant tendance à s'ouvrir avant la récolte, ce qui rend celle-ci délicate. De plus, le colza est difficile à implanter sur les sols riches en argile, la levée des plantules pouvant être pénalisée par des phénomènes d'hydromorphie. Le tournesol est également sensible à ce phénomène, avec les mêmes conséquences.
- Les légumineuses à graines sont peu utilisées, mais l'ont parfois été dans le passé, notamment le soja (*Glycine max*) et la lentille (*Lens culinaris*).

- Les fourrages cultivés sont, soit des légumineuses (la plus courante étant la luzerne, *Medicago sativa*), soit des mélanges d'espèces de graminées (dactyle, ray-grass). Dans le premier cas, entre 4 et 8 coupes peuvent être réalisées au cours d'une année, notamment si la parcelle est irriguée. Le second type de fourrage peut être mis en place sur des prairies permanentes ou temporaires qui peuvent aussi être pâturées par les animaux suivant les besoins, le nombre de coupes est alors plus variable. Ces prairies peuvent également être irriguées par submersion, sous forme de tours d'eau.

1.3. Les précédents cultureux

Chacune des dix cultures, étant parfois cultivées en rotations avec au moins une des autres, elles peuvent toutes être des précédents pour une partie des autres.

1.4. Les modes de conduite

Les deux modes de culture, conventionnel et biologique, se distinguent sur de nombreux aspects :

- Le choix des intrants (herbicides, semences et engrais minéraux) est contraint dans le cas des systèmes biologiques par un cahier des charges qui interdit notamment l'usage des produits de synthèse, ce qui certifie en retour la production par un label (AB).
- Les marchés des cultures conventionnelles sont pour la plupart nationaux ou internationaux, alors que les marchés des productions biologiques sont locaux ou nationaux, et sont souvent considérés comme des marchés de niches.
- Les impacts sur l'environnement des systèmes biologiques sont supposés plus faibles que ceux des systèmes en agriculture conventionnelle, notamment du fait de l'interdiction de l'usage des pesticides.

1.5. Les niveaux d'utilisation d'intrants

A partir des données que nous avons pu mobiliser pour décrire quantitativement les itinéraires techniques pratiqués pour chaque culture (voir chapitre 5), deux niveaux d'usage d'intrants ont été distingués pour les systèmes conventionnels. Il n'a pas été possible de distinguer deux niveaux pour les systèmes biologiques, du fait du manque de données. Pour chaque culture, des intrants différents peuvent être concernés par cette différence : il peut s'agir des fertilisants ou des pesticides.

2. Echelle de l'exploitation agricole : proposition d'une typologie des exploitations

Les choix de cultures, de rotations, d'assolements, et de systèmes techniques sont décidés à l'échelle de l'exploitation agricole (Dury *et al.*, 2011). Cependant, toutes les exploitations agricoles d'un même territoire ne présentent pas les mêmes caractéristiques sur le plan du milieu biophysique qu'elles exploitent et auxquelles elles sont soumises. Elles n'ont pas obligatoirement accès dans les mêmes proportions aux mêmes ressources naturelles. Par ailleurs leurs trajectoires individuelles diffèrent et elles s'inscrivent dans des réseaux socio-économiques variés (Bernet *et al.*, 2001). Cela entraîne des choix stratégiques et tactiques différents selon les exploitants. L'analyse des déterminants actuels de ces choix peut permettre d'identifier des marges de manœuvre et des contraintes pour guider l'évolution des systèmes techniques de ces exploitations (Dury *et al.*, 2011).

L'évaluation de scénarios de transformation des systèmes agricoles, de l'échelle de l'exploitation jusqu'à la région, nécessite une caractérisation de la diversité des exploitations agricoles du territoire étudié et un positionnement des types identifiés dans l'espace (Kjeldsen *et al.*, 2006; Andersen *et al.*, 2007).

Valbuena *et al.* (2008) et Righi *et al.* (2011) proposent d'utiliser une typologie des exploitations pour réaliser ce changement d'échelle, ce qui nécessite d'avoir des informations sur toutes les exploitations agricoles de cette région.

De multiples méthodologies peuvent être utilisées pour réaliser des typologies d'exploitations agricoles, selon l'objectif visé et les données disponibles, ce qui se traduit souvent par différents choix d'éléments de détermination pour réaliser la typologie.

Les typologies peuvent être classées selon un continuum basé sur les critères utilisés pour leur réalisation : d'un côté de ce continuum, on peut repérer les typologies élaborées à partir de critères structurels (dites « structurelles ») et d'un autre les typologies (dites « fonctionnelles ») construites sur des critères relatifs au fonctionnement de l'exploitation (Lopez Ridaura, 2011).

- Les typologies structurelles sont réalisées sur la base des caractéristiques naturelles, matérielles et humaines des exploitations (par exemple la SAU, les ressources naturelles en terme de type de sol, l'âge de l'exploitant) et de leurs systèmes de production agricole (les ateliers productifs pratiqués et leurs dimensions). Par exemple, Andersen *et al.* (2007) ont développé une typologie des exploitations européennes basée sur les principales activités de productions des exploitations. Tiftonell *et al.* (2010) ont élaboré une classification basée sur des indicateurs de

ressources (fertilité des sols, main d'œuvre disponible, présence d'animaux pour les travaux mécaniques).

- Les typologies fonctionnelles sont basées sur (i) des relations et flux entre différents compartiments du système et/ou (ii) des manières de gérer l'entreprise agricole : choix stratégiques, décisions tactiques et pratiques gestionnaires et/ou (iii) des trajectoires de transformation de l'entreprise. Par exemple, Bathfield et al. (Submitted) ont réalisé une analyse des stratégies d'adaptation d'exploitations agricoles à des changements économiques, en étudiant les mécanismes de flexibilité mis en œuvre.

Ces différentes formes de typologie sont réalisées pour différents objectifs (Lopez Ridaura, 2011), par exemple:

- Décrire l'hétérogénéité des exploitations : par exemple, Bathfield et al., (Submitted) analyse la diversité des réponses d'exploitants Guatémaltèques à la crise économique qui frappa les producteurs de café au début des années 2000.
- Proposer des alternatives techniques adaptées aux exploitations : par exemple, Blazy et al. (2009b) proposent d'utiliser une catégorisation des exploitations plutôt structurelle pour évaluer ex ante l'adoptabilité de prototypes de systèmes de cultures pour différents types d'exploitations,
- Cibler et évaluer des politiques publiques : par exemple, Andersen et al. (2007) mettent en avant une typologie comme outil de base pour des études portant sur l'analyse des politiques publiques.

Pour la Camargue, une typologie des exploitations, de nature plutôt fonctionnelle a déjà été produite, sur des critères de stratégies des agriculteurs pour le choix de pratiques culturales en lien avec des enjeux environnementaux (Jaeck *et al.*, 2009). Cependant, cette classification a été développée à partir d'informations non facilement accessibles et non disponibles pour l'ensemble des exploitations du territoire. Elle présente donc l'inconvénient de ne pas pouvoir être facilement spatialisée. De plus, cette typologie a été construite à partir d'une analyse économétrique ; ainsi les critères permettant de positionner une exploitation dans un type plutôt qu'un autre ne sont pas faciles à expliquer aux exploitants. Cela peut se révéler être un problème majeur pour son usage dans une démarche participative (Righi *et al.*, 2011).

Nous avons donc développé une nouvelle catégorisation des exploitations agricoles, avec comme cahier des charges qu'elle puisse être spatialisée sur l'ensemble du territoire de la région, et qu'elle puisse être discutée avec les agriculteurs et acteurs locaux. Nous avons

utilisé différents types de données. La typologie réalisée ainsi que sa spatialisation ont été analysées avec les acteurs locaux. Ceci a permis de poursuivre le travail de collaboration engagé avec les différents acteurs (voir chapitre 3). Ces échanges ont contribué au développement d'une relation de confiance avec ceux-ci.

2.1. Proposition d'une typologie des exploitations rizicoles de Camargue

Dans une première étape, nous avons analysé des données issues d'une enquête réalisée par l'UMR Lameta (INRA) en 2007. Ces données contenaient des informations sur plus de 110 exploitations gérées par 104 gestionnaires (un gestionnaire pouvant conduire plusieurs exploitations). Les principales variables disponibles dans cette enquête portent sur la structure de l'exploitation (surface totale, forme juridique, main d'œuvre disponible, activités agricoles principales...) ainsi que sur l'assolement et la présence ou non de productions en agriculture biologique, et la présence ou non d'élevage.

Ces variables ont été étudiées d'abord en utilisant des méthodes de statistiques descriptives, puis en utilisant des analyses en composantes principales et des analyses factorielles des correspondances, et ce en testant différentes hypothèses (un document confidentiel détaille le travail réalisé par Gaël Goulevant sur ces données). Peu de corrélations sont apparues entre les variables présentes dans la base de données et aucune valeur significative n'a pu être identifiée qui aurait permis de classer les exploitations.

Nous avons alors choisi d'utiliser une méthode de classification pour laquelle il est nécessaire de déterminer une variable permettant de classer les données : il s'agit d'un arbre de classification et de régression. Cette méthode est détaillée dans le chapitre 5, paragraphe 4. Le choix de cette variable a été guidé par plusieurs considérations :

- Nous souhaitons une variable permettant de synthétiser les stratégies des exploitants en termes d'usage du sol, et qui puisse être liée à des contraintes biophysiques influençant ces stratégies.
- Nous souhaitons que cette variable soit facile à appréhender par les acteurs locaux et les agriculteurs.
- Il fallait qu'elle soit disponible dans les données dont nous disposions.

Au regard de ces critères, la variable « part de riz dans la surface agricole utile (SAU) de l'exploitation » a été choisie comme variable à expliquer. L'arbre de classification et de régression a contribué à l'identification de variables expliquant la variabilité de la variable à expliquer au sein de la population d'exploitation: la part de blé dur dans la surface de

l'exploitation (cette variable est faiblement corrélée à la part de riz), l'orientation de l'exploitation (biologique ou non) et la présence ou non d'élevage. L'arbre fournissait également des seuils d'appartenance ainsi que le nombre de types d'exploitation. Ces informations ont permis de maximiser l'écart de variabilité entre les classes proposées et de minimiser la variabilité au sein d'une classe. Ces seuils ont donc été utilisés pour classer chaque exploitation de la base de données dans un type d'exploitation. Une première typologie basée sur les exploitations enquêtées en 2007 a donc été proposée.

Cependant, ce jeu de données comportait uniquement des exploitations cultivant du riz, et ne couvrait pas toutes les exploitations rizicoles camarguaises.

Pour compléter les données et pouvoir spatialiser la typologie, nous avons analysé les données du registre parcellaire graphique (RPG) mises à disposition par l'Agence de Service des Paiements²⁰. Les extractions pour les départements du Gard et des Bouches du Rhône ont été réalisées par l'Observatoire du Développement Rural de l'INRA de Toulouse qui a mis à notre disposition les données moyennant la signature d'une convention.

Ces données sont spatialisées et concernent l'ensemble du territoire camarguais. Des requêtes sous MapInfo® ont permis dans un premier temps d'extraire des deux départements toutes les exploitations (composées d'îlots au sens des déclarations des agriculteurs pour la Politique Agricole Commune) situées sur le territoire de la Réserve de Biosphère de Camargue (voir paragraphe 3 pour la définition des limites du système à l'échelle de la région et sous-région). Le degré de détail est l'îlot PAC, et les informations par îlot sont un identifiant d'exploitation permettant de repérer les îlots d'une même exploitation, la culture de l'îlot codée dans une classification avec 28 entrées et la surface de l'îlot.

Une première analyse de ces données, concernant les cultures, a révélé que la précision de celles-ci était insuffisante pour pouvoir affecter chaque exploitation à un type de la typologie précédemment définie. Cette base de données du RPG a donc été croisée (spatialement) avec une base de données d'occupation du sol établie en 2006 par le SMCG²¹ et la PNRC²² (voir annexe B à ce sujet pour plus de détails) et avec une base de données de type de sol (décrite

²⁰ L'ASP est un « opérateur interministériel et multi-sectoriel [qui] accompagne les décideurs du secteur public dans la mise en œuvre de leurs politiques ». C'est l'agence qui est en charge du paiement aux agriculteurs des aides de la PAC. <http://www.asp-public.fr/>

²¹ Syndicat Mixte de Gestion de la Camargue Gardoise

²² Parc Naturel Régional de Camargue

dans le paragraphe 1 de ce chapitre). Ceci nous a permis d'obtenir pour chaque exploitation camarguaise les espèces cultivées ainsi que les surfaces.

Toutes les exploitations présentes dans la base de données de l'enquête de 2007 ont été repérées dans la base de données croisées RPG-Occupation du sol 2006. Celles qui n'avaient pas été enquêtées en 2007 ont été identifiées. Cela concernait notamment celles qui ne produisent pas de riz ainsi que quelques exploitations rizicoles, dont certaines de très grande taille. Chacune a été affectée à un type à partir de leur assolement en 2006. Les exploitations de la plaine de Beaucaire-Fourques, hors de la zone cartographiée par le SMCG et la PNRC, ont été caractérisées avec les données du RPG et des images satellites (Google Maps© et Géo-portail©). La présence d'élevage a été visualisée sur des images satellites. Pour caractériser les types concernant le critère de mode de production, nous avons utilisé la liste des agriculteurs biologiques publiées par l'Agence Bio²³. Une cartographie des exploitations en fonction des types a été produite, et soumise à des experts de l'agriculture en Camargue afin de vérifier la cohérence des résultats.

Nous avons choisi de ne pas retenir les exploitations de SAU inférieure à 25 ha dans l'élaboration de la typologie. Pour d'autres travaux, il pourrait au contraire être opportun de s'intéresser en particulier à ces petites exploitations, notamment en termes d'emploi ou de pluri-activités.

2.2. Résultats : description des types d'exploitation

L'analyse des données d'enquête a permis de définir dix types d'exploitations cultivant du riz. Cette classification est basée sur l'assolement, ainsi que sur la présence du mode de conduite biologique. Les groupes les plus importants ont été subdivisés en deux (exploitations de taille moyenne et de grande taille à respectivement 3/4 - 1/4 de l'effectif du groupe initial selon la Surface Agricole Utile (SAU) de l'exploitation). En ajoutant à l'analyse toutes les exploitations du RPG, nous obtenons une typologie qui compte 15 types différents. Les pourcentages de chaque culture décrivant chaque type sont calculés en faisant la moyenne de ces pourcentages pour l'ensemble des exploitations du type concernés. Ces types sont décrits succinctement dans le tableau 4.3. Dans le cadre de cette étude, nous n'avons utilisé que les types d'exploitations produisant du riz. Il s'agit des dix premiers types présentés dans ce dernier tableau et dont les types de sol moyens sont décrits dans le tableau 4.4.

²³ <http://annuaire.agencebio.org/>

Tableau 4.3 : Description des types d'exploitations agricoles camarguaises proposés.

(-) signifie l'absence d'une culture prédominante au sein d'un même type d'exploitation sur les surfaces non cultivées en blé ou en riz. (?) signifie l'absence de données permettant de quantifier ou de qualifier le critère de typologie.

Type d'exploitation	Proportion de riz dans la SAU (%)	Proportion de blé dans la SAU (%)	Proportion autres cultures (%)	Surface moyenne (ha)	Proportion de la SAU en AB (%)	Présence d'élevage (oui/non)
Riziculteur de grande SAU	77	15	-	425	0	Non
Riziculteur de moyenne SAU	82	15	-	126	0	Non
Riziculteur céréalier de grande SAU	62	34	-	435	0	Non
Riziculteur céréalier de moyenne SAU	62	33	-	140	0	Non
Riziculteur partiellement en AB	64	26	-	420	21	Non
Céréaliier diversifié	27	56	9 (oléagineux)	190	0	Non
Céréaliier diversifié partiellement ou totalement en AB	33	46	9 (fourrages) 7 (oléagineux)	94	20	Non
Eleveur	35	34	24 (fourrages)	260	0	Oui
Eleveur partiellement en AB	36	17	42 (fourrages)	300	43	Oui
Eleveur biologique	10	17	50 (fourrages)	350	100	Oui
Céréaliiers sans riz (biologiques ou conventionnels)	0	?	?	?	?	Non
Eleveurs sans riz	0	?	>5 SAU en fourrages	?	?	Oui
Eleveurs extensifs (biologiques ou conventionnels)	0	?	Aucune culture	?	?	Oui
Viticulteurs (biologiques ou conventionnels)	<10% de la SAU	?	>20 SAU en vigne	?	?	?
Maraîchers ou arboriculteurs (biologiques ou conventionnels)	0	?	>25 SAU en maraîchage ou verger	?	?	?

Table 4.4 : Description des types de sol pour chaque type d'exploitation.

Chaque type d'exploitation est décrit par la proportion de chaque type de sol (Sols SH : Sableux hauts, AH : limono-argileux et argilo-limoneux hauts, AB : argilo-limoneux bas, SB : sols sodiques et hydromorphes). Dans ce tableau, nous détaillons les deux types de céréaliers diversifiés pratiquant l'agriculture biologique.

Type d'exploitation	Proportion de chaque type de sol (%)			
	SH	AH	AB	SB
Riziculteur de grande SAU	5	20	53	22
Riziculteur de moyenne SAU	5	20	53	22
Riziculteur céréalier de grande SAU	5	35	43	16
Riziculteur céréalier de moyenne SAU	5	35	43	16
Riziculteur partiellement en AB	4	31	53	12
Céréalier diversifié	3	45	41	10
Céréalier diversifié partiellement en AB	0	12	88	0
Céréalier diversifié biologique	0	49	19	32
Eleveur	7	10	33	49
Eleveur partiellement en AB	20	15	27	37
Eleveur biologique	7	37	19	37
Total	5	28	49	18

3. Caractérisation des systèmes à l'échelle régionale

3.1. Limites du territoire camarguais et des sous-régions

La Camargue est un territoire dont la définition des limites peut faire l'objet de multiples discussions. Les limites de ce territoire actuellement considérées par les acteurs sont celles de la réserve de Biosphère (programme de l'UNESCO Man And Biosphere, MAB) qui couvre plus de 160 000 ha.

Le petit Rhône (branche ouest du fleuve) délimite deux régions et deux départements administratifs français : à l'ouest du fleuve, le département du Gard appartient à la région Languedoc-Roussillon, à l'est le département des Bouches-du-Rhône fait partie de la région Provence Alpes Côtes d'Azur. Trois sous régions sont distinguées (figure 4.2) : la Camargue Gardoise (50 500 ha), la Grande Camargue (84 000 ha) et la Plan du Bourg (31 800 ha).

3.2. Caractérisation des périmètres des associations syndicales autorisées (ASA) de gestion de l'irrigation et de l'assainissement

Deux systèmes, gérés par des ASA, sont à distinguer dans la gestion territoriale de l'eau, selon qu'ils contribuent à l'irrigation ou à l'assainissement. La figure 4.3 présente une cartographie de 21 des ASA d'assainissement du territoire camarguais. Les systèmes d'irrigation permettent d'acheminer l'eau par des canaux jusqu'à un point d'entrée dans chaque exploitation du périmètre d'irrigation. La facturation de l'eau est établie sur la base de déclarations annuelles de mise en culture des terres. Les tarifs diffèrent entre les ASA pour l'irrigation et l'assainissement, mais sont souvent sur une base de surface et non de volume d'eau consommée. Une exploitation peut appartenir au périmètre de plusieurs ASA suivant la localisation des terres. Certains agriculteurs situés au bord du Rhône ont des pompes privées et payent directement une redevance aux Voies Navigables de France, alors que d'autres doivent pomper dans des canaux d'assainissement pour irriguer leurs parcelles. Le riz est de loin la culture la plus consommatrice d'eau, mais ce système d'irrigation est également utilisé pour mettre en eau les marais pour la chasse durant la saison hivernale, et pour irriguer d'autres cultures telles que le maïs, ou les prairies (sous forme d'arrosages ponctuels).

Les canaux d'assainissement forment un réseau parallèle à celui d'irrigation, qui permet d'évacuer les surplus d'eau des terres. Des pompes, situées au bord du Rhône, permettent d'évacuer ces surplus et d'ainsi assainir les sols, qui étant particulièrement bas en Camargue, seraient sinon souvent inondés.

Le fonctionnement de ces réseaux est extrêmement complexe, et de nombreux travaux de recherche ont porté sur leur fonctionnement et sur leur gestion (Chauvelon, 1998; Chauvelon *et al.*, 2003).

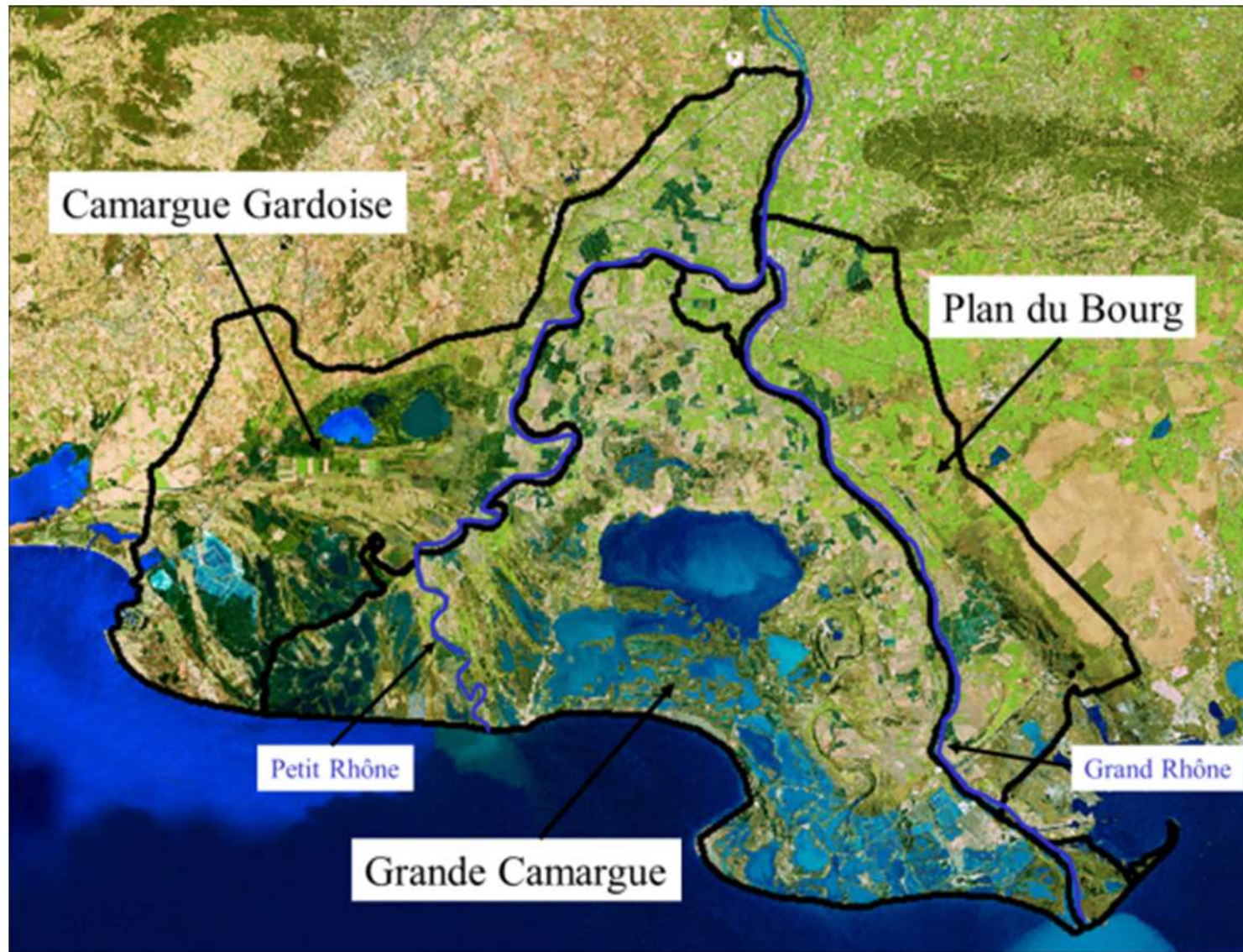


Figure 4.2 : Carte du territoire camarguais.

Sont différenciées les trois sous-régions, délimitées par les deux bras du Rhône. Ce périmètre correspond aux limites de la Réserve de Biosphère, programme Man And Biosphere, UNESCO (données et image satellite : PNRC, 2010 ; SMCG, 2010, mise en forme des données : Bertrand Chaussat, 2010).



Figure 4.3 : Cartographie des ASA d’assainissement sur le territoire camarguais.

Les ASA situées sur la pointe nord du territoire ne sont pas présentes sur cette carte, faute de données. (Données : Syndicat Mixte de la Camargue Gardoise, Syndicat Mixte de Gestion des Associations Syndicales Autorisées, 2010, Parc Naturel Régional de Camargue).

3.3. Spatialisation de la typologie pour l'agrégation à l'échelle de la région

La surface totale des exploitations faisant l'objet d'une déclaration PAC dans la zone de la Réserve de Biosphère de Camargue est d'environ 80 000 ha. Le RPG compte 612 exploitations (sont exclues celles dont une faible part des surfaces est sur le territoire de la Réserve de Biosphère). 138 de celles-ci ont une surface inférieure à 25ha (soit 22,5% de l'effectif) mais elles représentent seulement 1,8% de la superficie (soit 1 400 ha). L'analyse a donc été effectuée sur les 474 exploitations ayant une surface supérieure à 25ha. Le nombre d'exploitants semble légèrement inférieur, traduisant le fait que plusieurs exploitations peuvent être gérées par un seul exploitant. Pour les exploitations qui avait été enquêtées, nous disposons de l'information et avons donc pu les regrouper, pour ne considérer que 466 exploitations sur le territoire de la Réserve de Biosphère.

186 exploitations sont identifiées comme produisant du riz en 2006 ce qui représente 40% des exploitations de plus de 25ha et 55% de la superficie agricole. Le reste de la superficie est occupé par des éleveurs extensifs (22,5%) et des éleveurs sans riz (10%). A noter que les viticulteurs et maraîchers-arboriculteurs ne représentent que 8.4% des surfaces. Les céréaliers sans riz ne représentent que 4% de la superficie et 8,6% de l'effectif. La proportion de chaque type ainsi que la proportion de surface concernée à l'échelle de la région sont décrits dans le tableau 4.5. Les quatre premières lignes du tableau concernent les exploitations rizicoles, qui sont distinguées dans ce tableau (i) en fonction du mode de conduite, et pour celles qui produisent majoritairement du riz en agriculture conventionnelle, (ii) en fonction de la taille de l'exploitation.

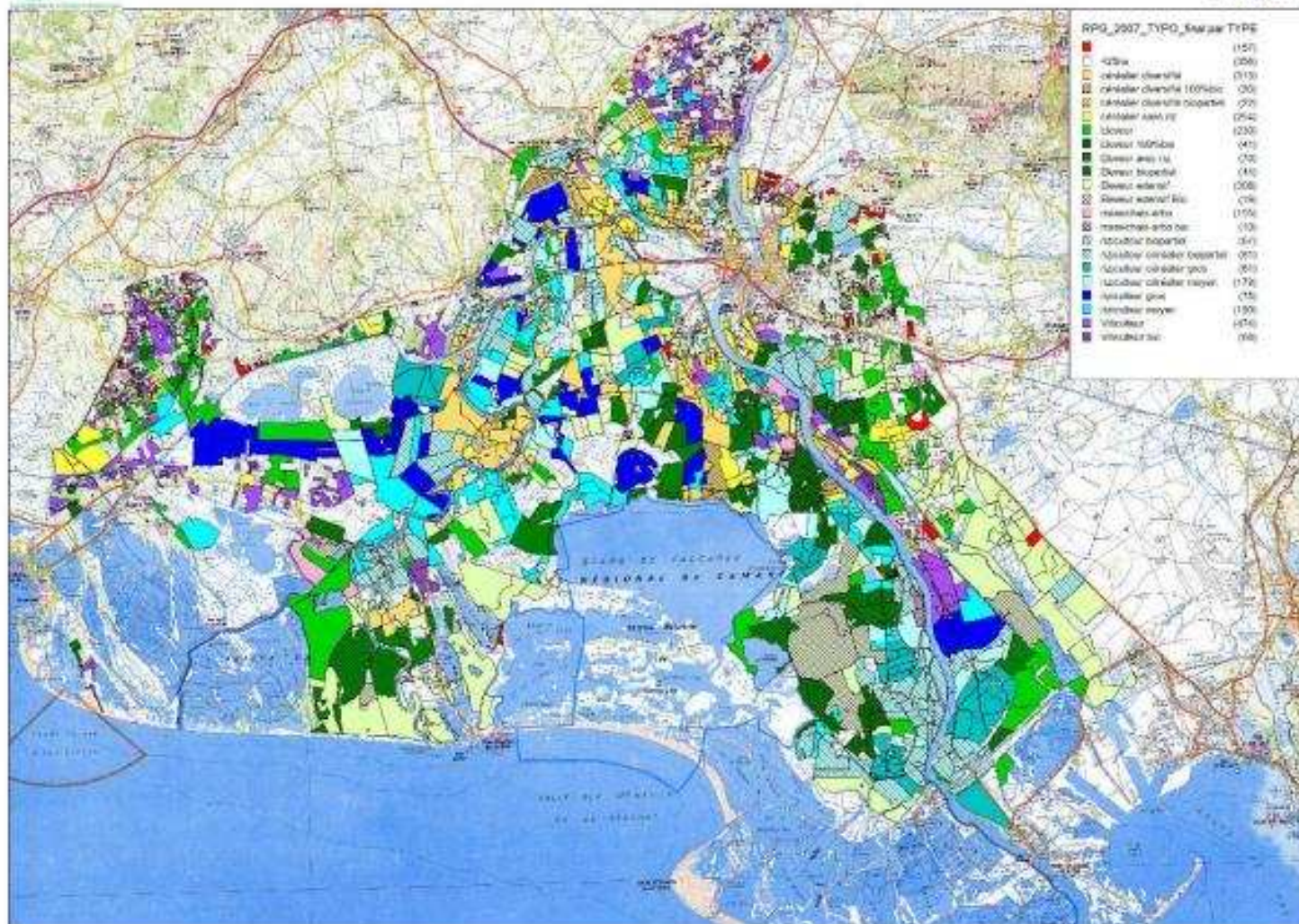
Tableau 4.5 : Pourcentage de la superficie et du nombre d'exploitations à l'échelle régionale pour chaque type d'exploitation, y compris celles ne produisant pas de riz.

	Groupes	% Exploitation % Superficie	100% biologique	Partiellement biologique	Conventionnelle	
Avec riz 40% 55%	Riziculteurs	12,2% 17,4%	0%	3,0% 8,1%]25;265 ha] 8,6% - 7,6%]265;1000ha] 2,1% - 6,2%
	Riziculteurs céréaliers	10,1% 15,3%	0%]25;276 ha] 6,9% - 6,3%]276;1101 ha] 1,7% - 4,5%
	Eleveurs	6,9% 13,2%	1,9% 3,0%	2,1% 4,6%	2,8% 5,7%	
	Céréaliers diversifiés	10,7% 9,3%	1,1% 0,8%	0,6% 0,7%	9,0% 7,9%	
Sans riz 60% 45%	Céréaliers sans riz	8,8% 4,0%	0%		8,8% 4,0%	
	Eleveurs sans riz	10,1% 9,9%	0%		10,1% 9,9%	
	Eleveurs extensifs	18,1% 22,5%	0,9% 3,9%		17,6% 18,6%	
	Viticulteurs	16,1% 6,5%	1,9% 1%		14,2% 5,5%	
	Maraîchers arboriculteurs	6,7% 2,0%	0,4% 0,1%		6,2% 1,8%	

La description de ces types d'exploitations est détaillée dans le rapport interne diffusé aux partenaires du projet et présenté en annexe C.

L'ensemble des exploitations étant cartographiée dans le RPG, nous avons donc utilisé ce dernier pour représenter spatialement la typologie. La figure 4.4 présente l'ensemble des exploitations situées dans la Réserve de Biosphère de Camargue en fonction de leur type.

Le tableau 4.6 résume le nombre d'exploitations de chaque type par sous-région et à l'échelle de la région, ainsi que les surfaces cultivées au sein de chaque type d'exploitations et pour chaque sous-région.



Sources : RPG 2007, IGN. Réalisation : Gael Goulevant et Sylvestre Delmotte, INRA UMR Innovation. 2011

Figure 4.4 : Cartographie des types d'exploitations agricoles camarguaises.

Chaque polygone correspond aux îlots PAC des déclarations. Les îlots sont coloriés en fonction du type d'exploitation. (Données : RPG 2007, ASP CNASEA 2010, Parc Naturel Régional de Camargue, Syndicat Mixte de Gestion de la Camargue Gardoise).

Tableau 4.6 : Spatialisation des types d'exploitations au sein de la région et des sous-régions.

Le nombre d'exploitations de chaque type est totalisé dans la colonne « Camargue », puis répartis pour chaque sous-région. Il s'agit du nombre d'exploitations de chaque type représenté dans chaque sous-région, car une même exploitation peut être à cheval sur plusieurs sous-régions. Les surfaces totales proposées sont par contre celles de toutes les parcelles d'une même sous-région, sans sur-représentation par des exploitations qui seraient sur deux régions.

Type d'exploitation	Nombre d'exploitations dans chaque sous-région et en Camargue				Surface totale (ha)			
	Camargue	Camargue Gardoise	Grande Camargue	Plan du Bourg	Camargue	Camargue Gardoise	Grande Camargue	Plan du Bourg
Riziculteur de grande SAU	15	8	6	1	4206	2194	1478	534
Riziculteur de moyenne SAU	43	15	26	2	5173	1927	2981	263
Riziculteur céréalier de grande SAU	8	1	5	2	4037	520	1397	1121
Riziculteur céréalier de moyenne SAU	37	4	28	5	3204	713	3128	462
Riziculteur partiellement en AB	18	3	10	5	5640.2	1021.2	3033.6	1585.4
Céréalier diversifié	47	21	22	4	5142.6	2164.6	2601.1	376.9
Céréalier diversifié partiellement en AB	3	2	1	0	487.4	443.6	43.8	0.0
Céréalier diversifié biologique	5	1	3	1	543.6	112.9	381.9	48.8
Eleveur	14	3	7	4	2902	417	1703	782
Eleveur partiellement en AB	12	2	9	1	3409	364	2995	67
Eleveur biologique	10	1	7	2	2061	36	14079	546
Total	186	61	124	27	32128	9896	21222	5787

4. Apports et limites des caractérisations des systèmes

4.1. Caractérisation des systèmes à l'échelle de la parcelle

La caractérisation des systèmes à l'échelle de la parcelle a permis d'avoir un cadre qui a guidé l'acquisition et l'analyse des données pour la description quantitative des activités agricoles (Chapitre 5). Cette formalisation a également pu être mobilisée sans difficulté majeure par des agriculteurs pour réaliser les simulations (voir chapitre 6), ainsi que par des acteurs locaux du territoire pour analyser les résultats d'autres simulations (voir chapitre 7).

Le croisement avec les données d'altitude a permis, après formulation d'hypothèses, d'obtenir une classification des sols qui fasse sens à la fois d'un point de vue agronomique et pour les agriculteurs. La plupart de ceux à qui nous avons présenté cette typologie, ont été capables d'y positionner leurs terres. La vérification de cette typologie des sols (proposées à partir de données spatialisées, voir figure 4.1) que nous avons entrepris en spatialisant 250 analyses de sol qui avaient été réalisées en Camargue au cours des 20 dernières années (Delmotte *et al.*, 2011), a permis d'évaluer la variabilité des caractéristiques des sols au sein de chaque classe de sols (Abdelkrim, 2011). Concernant l'altitude, les données du territoire de la Camargue Gardoise sont de bonne qualité (Modèle Numérique de Terrain, MNT). Elles sont par contre plus incertaines pour le territoire de la Grande Camargue et le Plan du Bourg. Depuis 2010, où nous avons réalisé ce travail de cartographie, un MNT a été acheté à l'IGN dans le cadre du Plan Rhône de l'Agence de l'eau, mais il ne couvre pas entièrement la zone et semble contenir des imprécisions (P. Chauvelon, Com. pers.).

Les données acquises et mises en forme pour chaque activité ne nous ont pas permis de considérer d'autres cultures qui pourraient être des alternatives à celles cultivées actuellement. Par exemple, le pois ou la féverole pourraient être ajoutées à la liste des cultures à envisager pour la Camargue, cependant nous n'avons pu acquérir des données sur les techniques culturales et les rendements pour celles-ci.

D'autres critères pour la définition des activités auraient pu être envisagés :

- Les conditions climatiques ont des conséquences sur le rendement, mais faute de temps et de données utilisables, nous nous sommes limités à identifier leur influence sur certaines variables, comme le rendement (voir chapitre 5).
- La culture précédant une culture comme le blé-dur, peut avoir une répercussion sur le rendement de ce dernier. Cependant, dans certain cas, la culture ante-précédente (celle qui a eu lieu avant la culture précédente) impacterait également le rendement d'un blé dur, comme l'ont mentionné certains agriculteurs enquêtés. Cependant, ce phénomène

n'est pas assez connu, comme en ont témoigné les exploitants et les experts de la céréaliculture sollicités pour ce travail, ce qui nous a conduit à ne pas considérer cet effet du fait de l'impossibilité de le quantifier.

Initialement, nous souhaitions caractériser les activités d'élevage au même titre que les activités de production de grandes cultures. Cependant, un premier travail sur le sujet a révélé que les données existantes étaient insuffisantes, notamment du fait de la grande diversité des systèmes camarguais en terme de conduite et de milieux mis en valeur (prairies salées, marais, friches...) (Hérault, 2010). Nous avons donc choisi de limiter l'étude aux activités de production de grandes cultures. Les autres activités (viticulture, arboriculture, maraîchage, horticulture) ont été laissées de côté au même titre que les activités d'élevage. D'autres modes de conduite actuellement étudiés par la recherche, comme les systèmes sans labour ou les cultures associées, auraient également pu être considérés dans l'analyse. Pour ces cas, c'est le manque de données spécifiques à la Camargue et la difficulté de les acquérir qui a conduit à cette orientation.

4.2. Caractérisation des systèmes à l'échelle de l'exploitation

Suite au choix fait lors de la définition des activités, nous avons détaillé la caractérisation des exploitations agricoles, sous forme d'une typologie, pour les systèmes céréaliers, et en particulier les systèmes produisant du riz. Cette typologie, discutée à de nombreuses reprises avec les agriculteurs et acteurs locaux, sert de base à l'agrégation des résultats à l'échelle du territoire.

Celle-ci croise un grand nombre de données qui ne sont pas toutes datées de la même année. Son utilisation doit donc toujours prendre en compte qu'il existe des incertitudes pour certaines exploitations qui pourraient avoir évoluées depuis l'enquête de 2007 ou dont l'assolement pourrait avoir beaucoup changé depuis la dernière cartographie de l'occupation du sol de 2006.

Il est prévu en 2011 de procéder à une nouvelle cartographie de l'usage du sol en Camargue dans le cadre de l'observatoire de la Réserve de Biosphère, ce qui pourrait donner lieu à une remise à jour de cette typologie. La comparaison avec celle présentée dans ce chapitre pourrait par ailleurs donner lieu à une analyse des trajectoires de changement et d'innovation des exploitations.

4.3. Caractérisation des systèmes à l'échelle du territoire

La caractérisation des systèmes aux échelles du territoire, des ASA et des sous-régions, était une étape nécessaire pour l'analyse des scénarios à ces échelles. Cette formalisation s'est beaucoup inspirée des souhaits des acteurs, rapportés au chapitre 3. Le choix des limites du territoire et la spatialisation de la typologie ont fait l'objet de beaucoup de discussions avec ceux-ci. Les limites choisies (celle de la Reserve de Biosphère) présentent deux avantages : (i) ce sont les plus larges parmi celles utilisées par les acteurs et le périmètre ainsi délimité comprend la quasi-intégralité de la production rizicole; (ii) la typologie spatialisée a été considérée par les acteurs comme étant un résultat important de notre travail, pouvant servir de base pour leurs propres réflexions.

Synthèse partielle

Ce chapitre a permis de présenter le cadre formalisé pour cette étude, en termes de systèmes étudiés à l'échelle de la parcelle, de l'exploitation et de la région. Cette formalisation a servi ensuite de base pour la description des activités agricoles (chapitre 5), ainsi que pour l'agrégation des résultats des scénarios de l'échelle de l'exploitation à l'échelle du territoire (chapitres 6 et 7).

Chapitre 5 : Description quantitative des activités agricoles par enquêtes, base de données, expertise et modélisation.

1. Positionnement du problème

Pour l'évaluation des systèmes agricoles sur la base de critères et indicateurs multiples, il est nécessaire de disposer de nombreuses informations quantifiées. La base de la caractérisation des systèmes à l'échelle de la parcelle, via la définition du concept d'activité, a été présentée dans le chapitre précédent. Il s'agit dans ce chapitre de quantifier les coefficients techniques pour l'ensemble de ces activités en Camargue.

Pour définir les données à acquérir, le mode de calcul de chaque indicateur (la liste est présentée dans le tableau 3.6) a été formalisé en détaillant les coefficients techniques qu'il nous fallait calculer. Le tableau 5.1 présente les indicateurs pour lesquels le calcul utilise plus d'un coefficient technique, dans le cas où il y en a un seul utilisé, par exemple le montant des subventions, l'indicateur est égal au coefficient technique pour l'activité considérée et ne figure pas dans le tableau 5.1.

Tableau 5.1 : Indicateurs calculés à l'échelle de la parcelle dont le calcul est basé sur des coefficients techniques.

Indicateurs calculés à l'échelle de la parcelle	Coefficients techniques utilisés
Coûts de production (€·h ⁻¹)	Coûts : main œuvre, intrants (fertilisants, pesticides, semences, carburant), mécanisation, irrigation et assainissement
Marge brute (€·h ⁻¹)	Coûts de production, rendements
Marge brute avec aides (€·h ⁻¹)	Idem que pour Marge brute + montant des aides
Part des intrants dans les coûts de production	Idem que pour Coûts de production
Part des aides dans la marge	Idem que pour Marge brute avec aide
Temps de travail sur un an (h·ha ⁻¹)	Temps de travail de chaque opération
Temps de travail par quinzaine de jours (h·ha ⁻¹)	Idem que précédent
Indice de Fréquence des Traitements	Nombre de passage à pleine dose

La description des itinéraires techniques mis en œuvre par les exploitants agricoles camarguais a déjà fait l'objet d'une étude en 2004 (Tercia-Consultant, 2005). Cette étude a donc servi de référence. Cependant, elle était limitée aux itinéraires du riz, du blé et de la

luzerne, et ne décrivait donc pas les itinéraires des autres cultures identifiées en Camargue (identifiées au chapitre 4). De plus les coûts des intrants ont beaucoup évolué depuis. Enfin, cette étude ne permettait pas de décrire l'ensemble des indicateurs que nous souhaitons calculer. Ces données ont donc été complétées.

L'objectif de ce chapitre est de présenter les différentes méthodologies mise en œuvre ainsi que les résultats obtenus lors de la quantification des coefficients techniques.

Ce chapitre s'articule autour des cinq méthodologies qui ont été mobilisées pour quantifier les coefficients techniques :

- La construction d'une base de données à partir d'enquêtes.
- L'analyse descriptive d'une base de données régionale.
- L'analyse statistique d'une base de données issue d'un travail de diagnostic agronomique.
- La formalisation de dires d'experts en ce qui concerne des données difficilement accessibles.
- La modélisation des cultures pour essayer de prendre en compte la variabilité des sols et du climat.

Pour chacune de ces méthodes, nous détaillons comment nous avons obtenu les données, comment nous les avons utilisées pour calculer les coefficients techniques, et finalement comment ces derniers sont utilisés par la suite dans cette thèse.

2. Description des itinéraires techniques des activités céréalières : première approche par enquêtes

Pour chacune des activités agricoles définies au chapitre 4, la finalité était de construire un itinéraire technique réaliste. Pour y parvenir, nous avons utilisé des données issues d'enquêtes en exploitation agricole : 7 enquêtes ont été réalisées en 2010 pour compléter les données contenues dans 19 rapports d'enquêtes réalisés entre les années 2000 et 2010 par des groupes d'étudiants de Montpellier SupAgro (Le Quéré, 2010).

2.1. Description des itinéraires techniques

Une première étape a consisté à formaliser les pratiques culturales mises en œuvre pour chaque activité et pour chaque exploitation enquêtée. Pour chacune des opérations nous avons détaillé les outils utilisés, la période de réalisation, la durée de l'opération et éventuellement les coûts des intrants utilisés. Les opérations culturales ont été classées en cinq groupes :

- gestion des résidus du précédent cultural : opérations spécifiques réalisées avant le travail du sol (brûlage/broyage/export)
- préparation de la parcelle : opérations et profondeur de travail
- mise en place de la culture : type de semoir (simple, combiné), densité de semis
- soins culturaux : dose d'engrais, fractionnement, formulation, outils ; traitements (herbicides, insecticides, fongicides), formulation commerciale, doses appliqués, désherbage mécanique, outils
- récolte : moisson ou fauche, fenaison, andainage, conditionnement

Pour chaque activité, la comparaison des itinéraires techniques mis en œuvre dans les différentes exploitations a permis de définir un itinéraire technique « de base » pour chaque culture, qui correspond à celui qui est le plus couramment réalisé dans les exploitations de la région. Le type de matériel utilisé étant similaire pour toutes les exploitations, nous avons fait l'hypothèse qu'il était possible de formaliser des itinéraires techniques communs à toutes les exploitations agricoles. Le matériel utilisé pour les calculs de coûts a été choisi en fonction du matériel présent dans la majorité des exploitations. La puissance du tracteur a été choisie pour chaque opération, sur la base de ceux utilisés dans les exploitations enquêtées. Cet itinéraire de base a ensuite été modifié et affiné pour toutes les activités liées à chaque culture, c'est-à-dire en fonction du précédent, du mode de conduite et du niveau d'intrant. Fautes d'informations, nous n'avons pas différencié les itinéraires techniques d'une activité selon le type de sol.

2.2. Evaluation des coûts des intrants

Différentes sources étaient à notre disposition pour évaluer le prix des intrants, mais elles ne dataient pas toutes de la même année. Elles correspondaient aux années comprises entre 2005 et 2010, soit une période pendant laquelle les prix des intrants ont beaucoup évolué. Nous avons choisi d'utiliser des références de prix de l'année 2009 car c'était l'année pour laquelle nous disposions du plus grand nombre de données. Dans les cas où nous ne disposions pas de données de l'année 2009, nous avons utilisé des estimations basées sur les évolutions des prix constatées depuis l'année des données (voir Le Quéré (2010) pour le détail des hypothèses et des calculs).

Pour les coûts de semences, nous avons utilisé des prix déclarés par les fournisseurs camarguais pour les semences conventionnelles, que nous avons confronté aux quelques données dont nous disposions dans les enquêtes mentionnées ci-dessus. Pour les coûts des fertilisants, nous avons utilisés les références d'Arvalis – Institut du Végétal, comparées également aux prix disponibles dans les enquêtes. Les coûts des produits pour la protection phytosanitaire du riz nous ont été fournis par le Centre Français du Riz. Pour les autres cultures, ils nous ont été fournis par Arvalis – Institut du Végétal. Les coûts de carburant proviennent du Ministère de l'Ecologie, de l'Environnement et du Développement Durable (prix DIREM 2009).

L'eau d'irrigation et l'assainissement des parcelles sont facturés par les Associations Syndicales Autorisées (ASA), mais le prix varie en fonction des ASA. De plus, certains agriculteurs ne dépendent pas d'ASA pour l'irrigation. Le calcul du coût de l'eau a nécessité un travail d'acquisition et d'analyse de données, rapporté en annexe D.

2.3. Evaluation du temps de travail par opération culturale

Le temps de travail est fonction du matériel utilisé (puissance du tracteur, type d'outil attelé/porté), mais également du type de sol (plus particulièrement pour les opérations de travail du sol), et des conditions climatiques. Des données sur les temps de travaux étaient disponibles dans les rapports, mais elles ne permettaient pas de prendre en compte ces deux derniers facteurs. Les données ont été classées par puissance de tracteur et par matériel utilisé, et homogénéisées en termes d'unité (heures par hectare, cf. Le Quéré (2010)). Les données obtenues pour différentes exploitations ont été comparées entre elles et la valeur médiane de temps de travail par opération et type de matériel a été choisie. Ces valeurs ont été comparées avec les valeurs proposées dans une étude plus ancienne (Tercia-Consultant, 2005), et complétées par les données issues des enquêtes en exploitation. Enfin, un matériel et un

tracteur type ont été choisis pour chaque opération de chaque activité et ont servi de base pour le calcul du temps de travail total de l'itinéraire technique.

2.4. Evaluation des consommations de carburant

La méthode d'estimation de la consommation de carburant est basée sur une description du matériel utilisé et du temps de travail, défini dans le paragraphe précédent. Le module de calcul du Centre Wallon de Recherches Agronomiques (CRA-W)²⁴ a été utilisé. Une consommation en l/h pour chaque opération a été obtenue et rapportée à la durée de chaque opération par hectare.

2.5. Evaluation des coûts de mécanisation

L'estimation des coûts de mécanisation pose plusieurs questions : c'est un coût qui ne peut se calculer qu'à l'échelle de l'exploitation, car il incorpore des coûts d'amortissement et d'entretien des outils qui dépendent du nombre d'hectares sur lequel sont utilisés les outils. Cependant, il est quasiment impossible d'estimer un coût réel pour chaque exploitation, du fait des différences de taille d'exploitation, du matériel disponible, de l'âge du matériel, etc. Nous avons donc choisi dans un premier temps d'évaluer ces coûts de mécanisation par exploitation type, ce qui permettait d'évaluer la variabilité des coûts de mécanisation d'une activité en fonction de la taille de l'exploitation et de l'assolement (et donc de la surface cultivée de chaque activité).

Arvalis – Institut du Végétal dispose d'un logiciel en ligne, Compétilis®, qui permet d'évaluer les coûts de production de nombreuses activités agricoles à l'échelle de l'exploitation agricole, y compris les charges de mécanisation. Cet outil de calcul a été mis à notre disposition dans le cadre du projet CASDAR – Structuration de la Filière Blé-dur biologique.

Pour chaque exploitation type, nous avons détaillé les rotations pratiquées, dont nous avons déduit les surfaces de chaque activité. Une activité a été définie dans Compétilis® comme une culture, un précédent, un mode de conduite et un niveau d'utilisation d'intrants. Au total, 18 exploitations agricoles types ont été saisies dans le logiciel. Pour chaque activité, entre 2 et 14 coûts calculés ont été obtenus, en fonction de la fréquence de l'activité dans les exploitations types. L'annexe D présente des exemples de valeurs de coûts de mécanisation pour différents types d'exploitation et différentes activités.

²⁴ <http://mecacost.cra.wallonie.be/index.php?page=3>

La variabilité de ces coûts de mécanisation entre types d'exploitation est faible par rapport aux coûts de production totaux et par rapport à l'incertitude sur les calculs. Intégrer dans la base de données des coûts de mécanisation par type d'exploitation posait de plus quelques difficultés : d'une part, il aurait fallu multiplier le nombre de base de données dans les modèles (un fichier par type d'exploitation), d'autre part si l'exploitation changeait d'assolement (et donc de type) au cours de la simulation, il aurait fallu que les coûts de mécanisation soient modifiés au regard de ce changement. Intégrer ce type d'interaction s'est donc révélé difficilement faisable, du moins pour les versions des modèles multi-agent et bioéconomique qui ont été développées au cours de cette thèse (chapitres 6 et 7). Une moyenne des coûts de mécanisation par activité a donc été calculée et utilisée.

Les résultats de cette méthodologie ne sont pas présentés spécifiquement dans cette partie mais dans le paragraphe 7 « Résultats et discussions » de ce chapitre.

3. Analyse d'une base de données regroupant les pratiques de fertilisation et de protection phytosanitaire en production rizicole

Afin de compléter les données issues des enquêtes en exploitations agricoles, qui sont en faible nombre, et de vérifier la représentativité des itinéraires techniques formalisés, nous souhaitons disposer de données concernant les outils de travail du sol utilisés et les produits phytosanitaires et fertilisants appliqués pour la majorité des exploitations camarguaises.

Pour le premier type d'information, nous avons créé une enquête en ligne, dont le lien a été envoyé par mail aux riziculteurs par le Syndicat des Riziculteurs de France et Filières (SRFF). Cependant, le faible taux de réponse et le manque de temps pour relancer cette démarche nous ont conduits à renoncer à l'analyse des données obtenues.

En ce qui concerne les pratiques de protection phytosanitaire et de fertilisation, la signature d'une convention avec le SRFF nous a permis d'accéder aux données issues des déclarations obligatoires des riziculteurs pour l'Identification Géographique Protégée « Riz de Camargue ». Ces déclarations contiennent des informations sur les itinéraires techniques mis en œuvre par les riziculteurs sur les îlots²⁵ en riz (surface de l'îlot concerné, date de semis, variété, fertilisation, protection phytosanitaire). Le jeu de données concerne 158 agriculteurs, 787 îlots dont 755 inclus dans l'IGP et couvrant 17457 ha et 161 ha hors IGP. Malgré quelques données manquantes, nous avons pu confirmer et détailler différents itinéraires

²⁵ Groupe de parcelles cultivées de manière homogène

techniques pour la culture du riz, notamment au niveau du choix des molécules utilisées pour la protection phytosanitaire et pour la fertilisation. Le détail de l'analyse de ces données est présenté dans un document qui reste confidentiel, comme stipulé dans la convention avec le SRFF.

4. Analyse d'une base de données issue d'expérimentations en Camargue

Introduction générale

Pour la définition des valeurs de rendement du riz, nous disposons au sein de l'équipe de recherche de l'UMR Innovation, d'une base de données issue du suivi de plus de 380 parcelles de riziculteurs camarguais depuis 1992. Cette base de données (fournies par JC Mouret) a fait l'objet d'une analyse en vue de déterminer les facteurs influençant le rendement du riz en Camargue et a fait l'objet d'une publication dans la revue scientifique « European Journal of Agronomy ».

On Farm assessment of rice yield variability and productivity gaps between organic and conventional cropping systems under Mediterranean climate²⁶

Delmotte¹, S., Tiftonell², P., Mouret¹, J.-C., Hammond¹, R., Lopez-Ridaura¹, S. *

¹ INRA, UMR Innovation 951, 34060 Montpellier Cedex 2, France

² Unité de Recherche Systèmes de Culture Annuels, CIRAD-Persyst, TA B 102/02 Avenue Agropolis, 34398-Montpellier cedex 5, France

*Corresponding author: ridaura@supagro.inra.fr

Keywords: Yield gap; Farmer innovation; Classification and Regression Tree; Long-term crop productivity; Weed competition; Ecological intensification

Abstract

Organic rice production is characterised by high yield variability and substantial productivity gaps with respect to conventional systems. Variability may be accentuated in areas of erratic climate, such as in the Mediterranean region of *La Camargue* in southern France. While management recommendations for organic cropping systems are not readily available, innovative farmers develop strategies to achieve high and less variable, yields. The objectives of this study were to identify the main factors affecting yield variability and farmer management strategies used to sustain crop productivity while reducing input use. Participatory monitoring of farmer fields for yields, yield components, soil condition, weeds and management practices from 1992 to 2009 resulted in a database of more than 380 entries. These data included continuous, discrete and nominal variables. They were explored using classification and regression trees to describe management strategies under conventional and organic systems and to identify and categorise the main variables associated with rice yield variability. Rice yields varied between 0.5 and 10 t ha⁻¹ under conventional and between 0 and 9 t ha⁻¹ under organic management. Weed competition was the main factor affecting yield for both conventional and organic systems. The gap between current average yields and the estimated yield potential of 10 t ha⁻¹ was on average 2.7 t ha⁻¹ under conventional and 5 t ha⁻¹

²⁶ Delmotte, S., Tiftonell, P., Mouret, J.C., Hammond, R., Lopez-Ridaura, S., 2011. On farm assessment of rice yield variability and productivity gaps between organic and conventional cropping systems under Mediterranean climate. *European Journal of Agronomy* 35, 223-236.

under organic management. The latter can be largely attributed to the effect of weed competition. The productivity gap between conventional and organic management fluctuated between c. 1 t ha⁻¹ year⁻¹ under conducive conditions and c. 4 t ha⁻¹ year⁻¹ under limiting conditions (e.g., severe salinity problems). Strategies to attain high yields under conventional and organic management differed: Under conventional management, a low initial plant stand associated with early sowing was compensated by high tillering rates induced through N fertilisation, while weeds were controlled by herbicides. Under organic management, late sowing allowed a higher initial plant density due to higher temperatures during emergence. This higher density ensured greater competition with weeds and sufficient number of panicles per unit area at harvest. If organic rice production is to be further promoted in Mediterranean regions, such innovations should be supported by technical means such as short cycle varieties adapted to late sowing under high latitudes. Other alternatives to outcompete and/or control weeds without the need for herbicides, notably through irrigation water management, crop rotation or use of cover crops must also be explored. These results indicate that farmer innovations may show possible pathways towards the ecological intensification of current agriculture.

1. Introduction

Yield variability is one of the major constraints facing irrigated rice production in Mediterranean regions, particularly in agro-climatic zones located on the latitudinal boundary for rice growing due to low temperatures (Puard et al., 1999). Climatic and soil conditions that influence the various yield components of irrigated rice may be either reinforced or counter-balanced through agronomic management, including variety choice. Relatively small changes in sowing date or in the rate of development from emergence to flowering may lead to important yield reduction due to cold-induced sterility (Confalonieri et al., 2009). Some of the factors that influence yield variability may be more accentuated under organic rice production, due to the variability associated with the use of organic fertilisers, incidence of pest and diseases, and weed competition. The effects of these factors are often interdependent, and interact to determine important productivity gaps between organic and conventional rice cropping systems. Identifying the factors that determine yield variability and productivity gaps between organic and conventional management is an important step towards the design of more ecologically intensive rice cropping systems.

Methods for assessing yield variability and productivity gaps often make use of experimental results obtained on research stations (Boling et al., 2004; Mussnug et al., 2006; Katsura et al., 2008), which disregard the variability inherent under farm conditions. Comprehensive diagnosis of yield variability requires monitoring farmer fields in space and time to assess the impacts of climate, soils, biotic constraints and management practices (Doré *et al.*, 1997; Becker *et al.*, 1999; Doré *et al.*, 2008). Classical statistical methods have been used to analyse yield variability, such as regression, correlation or principal components analysis (e.g., Casanova et al., (1999); Mouret et al., (2003); Poussin et al.(2003); Valantin-Morison et al.,(2008)). Others used simulation models to assess yield potential and study yield gaps with respect to on farm yields (e.g., Becker and Johnson, 1999). The analysis of multiple interactions between target and explanatory variables often requires multivariate analysis and the ability to deal with non-linear relationships. Field survey data often includes continuous and discrete, categorical variables, highly skewed data and frequently a large number of missing observations. To deal with such complexity, a few recent studies have made use of classification and regression tree analysis (Roel et al., (2007); Tittonell et al., (2008); Ferraro et al., (2009) to categorise groups of observations that are homogeneous in terms of target and driving variables, and which can be analysed individually and comparatively.

The protected area of *La Camargue*, France is considered to be an important reservoir of biodiversity and cultural inheritance. Irrigated rice produced in the region contributes to preventing high levels of salinity in low lying soils and offers a temporary habitat to migratory bird species. Since rice production plays also an important role in the regional economy, there is increasing interest in promoting high yielding, ecologically intensive rice production systems to minimise impacts on the environment. Continuous rice-after-rice cropping leads to large quantities of pesticides being used, which disperse throughout the environment (Roche *et al.*, 2000; Comoretto *et al.*, 2007; Comoretto *et al.*, 2008). Strong environmental concerns were raised on this issue, in view of the vicinity of rice fields to nature reserves (e.g., Roche *et al.*, 2000). Strictly organic rice production is often unattractive to local farmers due to the high risks associated with yield variability. Only about 5% of the total area is cropped to organic rice, where yields may vary widely between 1 and 9 t ha⁻¹ among farms within single seasons. Average yields under conventional management are around 6 t ha⁻¹ (*Centre Français du Riz* - Statistics 2009). Participatory monitoring of local farmer fields and practices over two decades revealed complex interactions between climate, soil and management factors controlling crop productivity under both conventional and organic management (Mouret *et al.*, 2003). Our aim was to capture farmer innovations to guide the design of ecologically intensive cropping systems, which seek to maximise the natural functionalities that ecosystems offer (Doré *et al.*, 2011). Our objectives were (i) to unravel the complexity of such interactions to identify the main determinants of rice yield variability and productivity gaps, and (ii) to identify farmer management strategies that lead to high yields while reducing external input use. We examined their impact on major yield components, categorised their variability in relatively homogeneous groups through classification trees, and compared practices and environmental conditions leading to best yields under conventional and organic management.

2. Materials and methods

2.1 The study area

La Camargue is a deltaic region of 167,000 ha in the south of France (43°40N; 4°37E; 5 meters above sea level). Around 70,000 ha are used for agricultural production and the rest is protected for nature conservation – a UNESCO reserve of biosphere since 1977, and the siege of public and private natural reserves where species protection and eco-tourism are important activities. Agriculture has an important function in the economic, ecological and social equilibrium of the region. Irrigation of rice fields plays a crucial role in its hydrology, and

prevents the accumulation of salt on the soil surface that results from a negative water balance (600 mm deficit between rain and evapo-transpiration (Chauvelon, 1998). According to the local Rice Growers Union, about 20,000 ha are devoted each year to rice production (Figure 1).

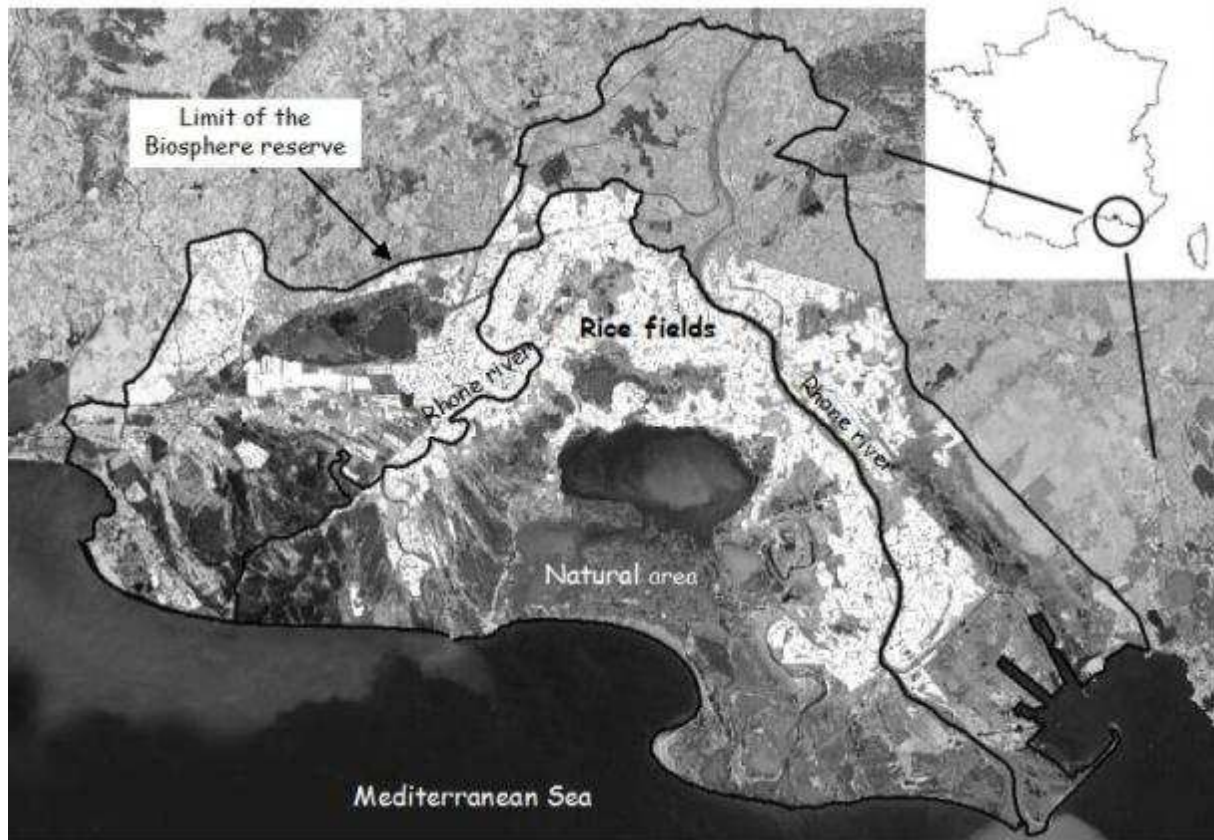


Figure 1: Map of the rice growing region of La Camargue, Rhône delta, France. All fields suitable for rice cultivation are indicated in white, as derived from 2006 land use (sources: National Reserve of Camargue and *Syndicat Mixte de Gestion de la Camargue Gardoise*). Black lines indicate the boundaries of the region (land use data were missing for the northern sector).

Rice production is the dominant activity of the local farming systems. Depending on soil types (from sandy soils to clay soils, from shallow to deep soils), rice can be grown in rotation with rainfed crops. In shallow soils that are subject to hydromorphic conditions in winter, only spring crops are grown and farmers often prefer continuous rice cultivation. In deep soils, durum wheat is the most frequent crop after rice, rice being cultivated during periods of one to five years. Less frequent are maize, sorghum, pea, sunflower and oil seed rape. In organic systems, rice cannot be easily grown over two consecutive years due to weed pressure. Organic rotations often include durum wheat and secondarily alfalfa or sunflower. To reduce weed pressure, farmers grow rice once in four years at maximum. Some farmers

often ‘convert’ a slot of land into organic, through a two-year period during which no pesticides or mineral fertilizers can be used. An individual farmer can therefore have both organic and conventional rice on its farm. The regulation stipulates that the rice varieties grown under organic and conventional systems on the same farm should be visually distinguishable: farmers sow different types of grain (long or round, red rice, etc.) under organic management.

Average rice yields in the region varied between 4.8 and 6.5 t ha⁻¹ between 1989 and 2009 (data of 2009 from the Rice Growers Union). Yield variability is inherently wide, due to the narrow window between sowing and harvest at this latitude, low temperatures at the start of the season and heavy rains around harvest time. Sowing dates and techniques, or the choice of the correct cultivar are crucial. Rice is commonly sown around the 1st May, but sowing dates are delayed if minimum temperatures are below 13 °C. Average minimum air temperatures for the first 10 days of May varied between 11.5 and 14.5 °C since 1992, reflecting important inter-annual variation. Attempts to correlate average minimum temperatures and yields have failed, due to the many other factors determining yield variability over the season, particularly under organic management (Mouret et al., 2001). Conventional grown irrigated rice are less variable but may exhibit extreme yields of 0.5 or of 10 t ha⁻¹ in contrasting seasons, soil and farm types (Mouret *et al.*, 2003).

2.2 Data collection and processing

From 1992 to 2009, researchers at the French National Agricultural Research Institute (INRA) have followed rice fields under farmer management in *La Camargue*. They have monitored spatio-temporal yield variability resulting from management practices and environmental conditions, and involved farmers in the definition of research objectives and field selection. The resulting database consists of 380 entries, corresponding to fields of 65 farms. Each season, fields to be monitored were located on contrasting landscape locations across the entire region to capture the variability of soil conditions. Each field was monitored during the whole cropping season within so-called ‘field stations’, which correspond to square surfaces of 100 m² where five plots of 0.25 m² were delimited for observation, counting and sampling. Farmers practices such as soil preparation, cultivars, sowing dates, quantity of seed sown, preceding crop (whether it was rice or not), fertilizer use, herbicide applications, etc. were recorded (Table 1). After emergence, seedlings of rice and weeds were surveyed to calculate

initial stand densities of crop and weeds. Flowering dates were recorded when 50% of the panicles were at this stage.

At harvest, grain, straw and weed biomass was collected at the five plots, dried at 60°C until constant weight, and weighed. Dry matter biomass was used to determine yield and yield components, which were averaged for each field station. Weed biomass was determined per species. Grain sterility was assessed by counting empty grains in 20 panicles per sample. Tillering rate was estimated from rice stand density at emergence and the number of panicles at harvest (Table 1). Weather data, minimum and maximum air temperature, rainfall, wind speed, global solar radiation and relative humidity were recorded on a daily basis at a weather station located at the centre of the rice growing area, and used to calculate different climate indicators (Table 1). Soils were sampled at the beginning of the season on a diagonal transect across the 100 m² field stations, at a depth of 0-20 cm. Soils sampled along the transect were thoroughly mixed and a composite sub-sample of c. 0.5 kg was kept in a cool box at 4 °C and taken to the laboratory. Soil analysis consisted of particle size distribution, pH (1: 2.5 soil/water suspension), organic carbon content (Walkey and Black), total soil nitrogen content (Kjeldahl), available phosphorus (Olsen), cation exchange capacity and exchangeable cations of the saturated extract (Ca²⁺, Mg²⁺, K⁺ and Na⁺) through photometry and soil electrical conductivity (CIRAD Soil Analysis Handbook). From the total of 380 fields sampled, 263 correspond to conventional and 119 to organic rice cropping systems. Soil data were missing for 37 (11%) of the fields.

Table 1: Type of variables included in the classification and regression analysis

<i>Type</i>	<i>Description</i>
Yield and yield components	Stand density at emergence (pl m ⁻²) Number of wild rice seedlings at emergence (.m ⁻²) Number of <i>Echinochloa crus-galli</i> at emergence (.m ⁻²) Number of <i>Cyperus difformis</i> and <i>Bolboschoenus maritimus</i> at emergence (.m ⁻²) Dates of flowering (50% of panicles flowered) and of maturing (Julian days) Duration of the vegetative period (Julian days) Number of panicles per square meter at harvest Weight of 1000 grains (g) Grain sterility (counted on 20 panicles) (%) Tillering rate = (nr. of panicles - stand density)/stand density Absence/ presence of <i>Echinochloa crus-galli</i> (0, 1) Rice grain yield and aboveground biomass (t ha ⁻¹), Crop Harvest Index
Climatic variables	Mean and minimum air temperatures during the ten days after sowing (°C) Mean, minimum and mean minimum air temperatures during the ten days before flowering (°C) Total global solar radiation between sowing and flowering (J m ⁻²) Total global solar radiation between flowering and maturity (J m ⁻²) Cumulated mean air temperature between sowing and flowering (°C) Cumulated mean air temperature between flowering and maturity (°C)
Soil conditions	Clay content (%) Soil organic matter(% of dry weight) Total soil nitrogen (g kg ⁻¹) Carbon to nitrogen ratio Extractable phosphorus (Olsen) in mg kg ⁻¹ Exchangeable potassium in cmol ₍₊₎ kg ⁻¹ Cationic exchange capacity (CEC) in cmol ₍₊₎ kg ⁻¹ Sodium saturation of the CEC Electric conductivity (μS m ⁻¹)
Management practices	Management system: binary variable indicating whether the crop is conventionally or organically grown Residue management: nominal variable indicating whether residues from previous crop were burned, exported or incorporated Precedent: binary variable indicating whether the precedent crop is rice (1) or not (0) Cultivar: nominal variable indicating the rice variety Moisture: nominal variable indicating whether the soil was dry, fully irrigated, or wet at sowing Sowing: Nominal variable indicating whether seeds were broadcasted, sown in rows or in pockets Coating: binary variable indicating whether the seeds were protected or not by fungicides Date of sowing (Julian days) Number of herbicide applications before sowing Number of herbicide applications after sowing Number of insecticide applications Number of fungicide applications Total biomass of weeds at harvest (t ha ⁻¹) Total nitrogen applied in fertilizers (kg ha ⁻¹) Total phosphorus applied in fertilizers (kg ha ⁻¹) Total potassium applied in fertilizers (kg ha ⁻¹) Total phosphorus available (Fertilizer + soil available) Total potassium available (Fertilizer + soil available)

2.3 Yield variability and yield gap analysis

Explanatory variables for yield variability were grouped into the following categories: yield components, weeds, climate, soils and management (Table 1). A first descriptive analysis was performed to identify data that exhibited discontinuities, highly correlated variables, extreme outliers or poorly representative situations. For example, two fields located in low lying positions and clayey soils had soil organic matter contents close to 10%. These values were out of the normal range of soil variability, uncommon for the region, and had high leverage in the analysis. When researcher ‘treatments’ were conducted within the field stations, these fields were discarded from the analysis e.g., the transplanting or simplified sowing techniques that were tried in some fields in 2004. A total of 351 rice fields remained in the database after filtering through these criteria, 245 conventional and 106 organic.

Classification and regression trees were used to identify the main factors controlling yield variability and categorised the observations into relatively homogeneous groups. The method and its applicability in agricultural research are described in detail in Tittonell et al. (2008). The classification trees consist of splitting variables (criteria), splitting nodes and terminal nodes (clusters). Trees can be built stepwise, adding explanatory variables to split the data into increasing numbers of clusters with less internal variability. When outliers are present in the dataset, they may be grouped within an independent terminal node containing few observations. Since this may not add to the categorisation of the main sources of variability, outliers must be identified *a priori*. The relative error of the regression model decreases as the number of terminal nodes increases. Beyond a certain number of terminal nodes the relative error may increase again, as adding new explanatory variables does not improve the model. We adopted a tolerance level of 20% relative error.

The analysis of yield variability was done iteratively. We first analysed the entire dataset, including both conventional and organic rice fields to examine of the overall variability affecting rice yield. Having identified weed competition as a main factor controlling yield variability, we conducted a classification tree on weed biomass at harvest to study the determinants of this variable. Next, we analysed conventional and organic rice fields separately and discarded weed biomass at harvest as an explanatory variable. This removed the masking effect of this variable, which co-varied with rice yield under both systems (i.e., weed biomass depends also on soil quality, N availability, sowing dates, etc.). The clusters thus obtained (terminal nodes), were examined in detail to identify the factors that lead to

high yields under both systems, and to analyse the yield gaps between them. At each step, small outlying groups identified in the classification trees were explicitly removed from successive analyses to reduce their leverage. Each group was then analysed independently, and finally compared on the basis of the means and confidence intervals for the various explanatory variables retained in the analysis.

The yields and yield variability observed under conventional management were used as reference for the calculation of productivity gaps. The relationship between explanatory variables and rice yield under conventional management was analysed through bi-dimensional scatter plots and fitting boundary line models, following Shatar and McBratney (2004). Boundary lines were fitted through boundary points that corresponded to the highest response of the dependent variable at each value of the independent variable (e.g., the maximum yield values observed at each given value of an explanatory variable), using the following model (Fermont et al., 2009):

$$y_l = \frac{y_{\max}}{(1 + (K \times EXP(-R \times x)))} \quad (1)$$

Where, y_{\max} is the observed maximum level of the target variable, x is the independent variable and K and R are constants. The best boundary line model (y_l) was obtained by minimizing the root mean squared error (RMSE) between the fitted boundary line and the boundary points. When the boundary responses described an exponential decline with respect to the independent variable, the following model was fitted:

$$y_l = y_e + (y_0 - y_e) \times EXP(-k \times x) \quad (2)$$

Where, y_e is the lower asymptote, y_0 the initial value of y_l and k the relative decline rate. In all cases, the best boundary line model (y_l) was obtained by minimizing the RMSE between the fitted boundary line and the boundary points. Yield gaps were calculated as the difference between (1) the average yields under conventional and organic production and (2) the average yield of the high yielding clusters obtained through classification and regression tree analysis. The analysis was done using Genstat 12th version.

3. Results

3.1 Rice yield variability

The average rice grain yield observed in all the fields monitored from 1992 to 2009 was $5.6 \pm 2.0 \text{ t ha}^{-1}$, which is well within the range of average yields observed in *La Camargue* ((Mouret *et al.*, 2003)). Average yields for conventional and organic rice were respectively 6.3 ± 1.6 and $4.3 \pm 2.3 \text{ t ha}^{-1}$, which results in an average difference between both management systems of about 2 t ha^{-1} over seasons, soil types and management situations. Yields ranged widely from virtually zero to 10 t ha^{-1} , with greater variability under organic than conventional systems (Figure 2). High variability was observed in the yield components stand density at emergence and number of panicles at harvest (Figure 3). The stand density at emergence, however, explained little of the overall yield variability (Figure 3A). While the weight of a thousand grains did not vary much between management systems (24 ± 3 vs. $23 \pm 3 \text{ g}$, respectively), rice grown under conventional management exhibited a greater capacity to compensate for poor stand densities at emergence through more profuse tillering at low densities (Figure 3B). Under organic management the number of panicles per unit area increased almost proportionally ($r^2 = 0.6$, $P < 0.01$, line not shown) with the stand density at emergence (Figure 3C). The number of panicles at harvest was generally greater under conventional management, and obviously one of the variables most closely related with yield variability under both conventional and organic management (Figure 3D).

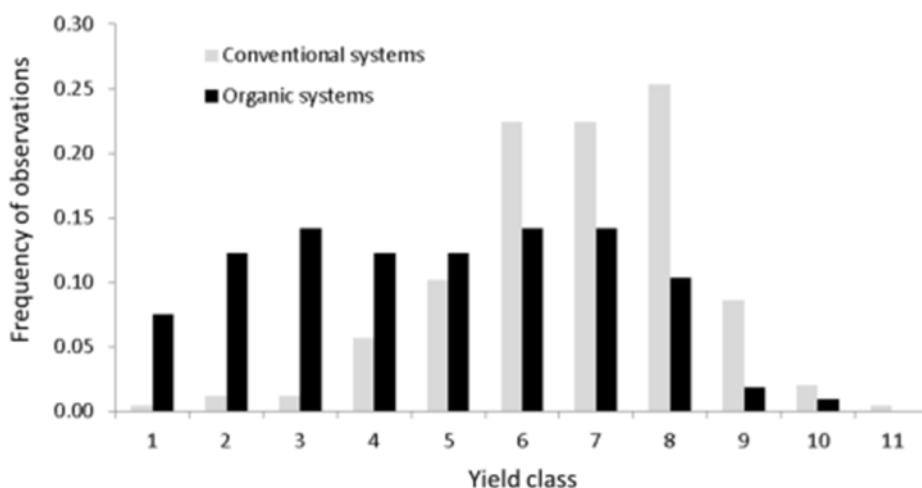


Figure 2: Frequency distribution of yield for both organic and conventional systems. Class 1 correspond to yield below 1 t ha^{-1} , class 2 to yield below 2 t ha^{-1} , etc.

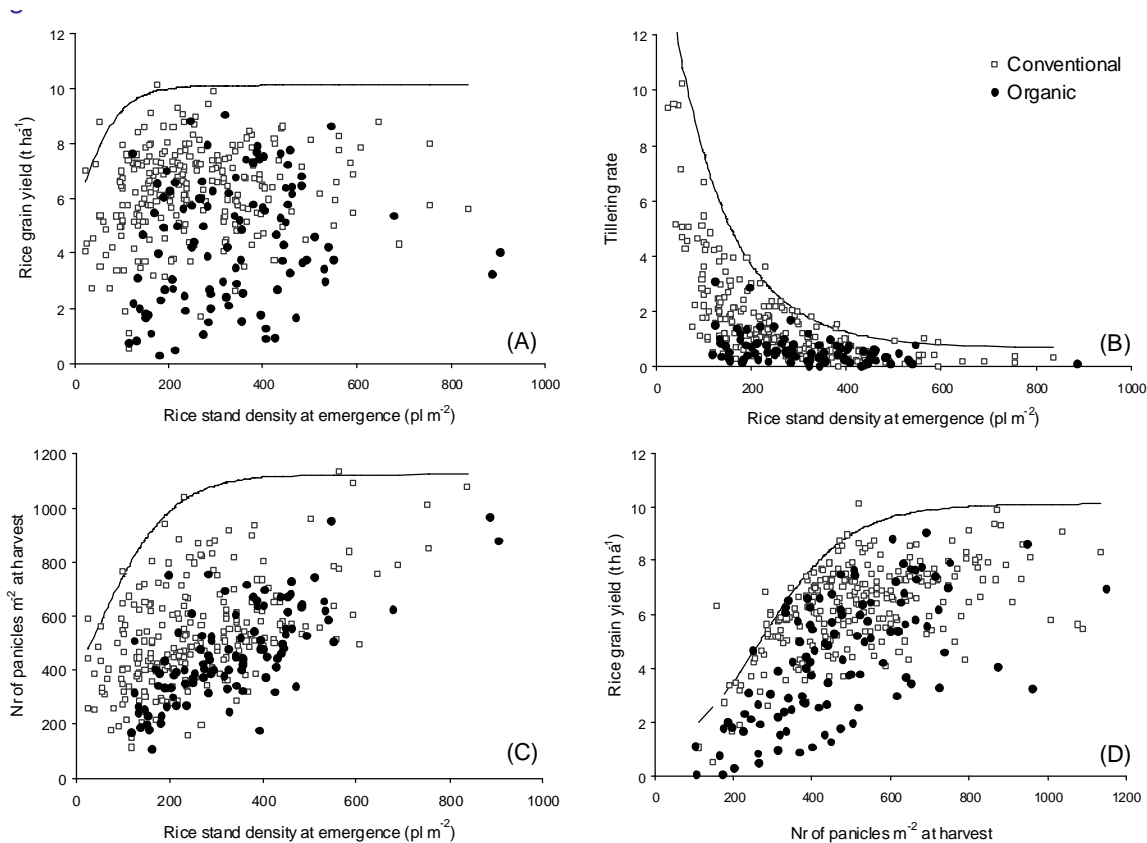


Figure 3: The relationship between rice stand density at emergence and (A) grain yield, (B) tillering rate (cf. Table 1) and (C) the density of panicles at harvest, and (D) between the latter and rice grain yield under conventional ($n = 245$) and organic ($n = 109$) management. Boundary line models were fitted to the observations under conventional management: (A) $y_l = 10.1 / (1 + 10.1 \times \exp(-0.022 \times x))$; (B) $y_l = 0.7 + (17 - 0.7) \times \exp(-0.0085 \times x)$; (C) $y_l = 1125 / (1 + 1.85 \times \exp(-0.013 \times x))$; (D) $y_l = 10.1 / (1 + 11.2 \times \exp(-0.009 \times x))$.

Field experience and farmer perception often identify soil quality and fertiliser use as reliable variables to explain yield variability. This was not entirely confirmed by our observations (Figure 4). Soil clay content, which appears as a surrogate for soil fertility (Figure 4A-C), explains little of the yield variability (Figure 4D). Nor did the electrical conductivity of the soil solution, which can be high in the saturated soils of *La Camargue* (Figure 4E). Nitrogen inputs in mineral fertilisers under conventional management were greater than under organic rice fields which received organic fertilizers or animal manures (Figure 4F). Yield variability was not well explained by N inputs, with organically managed fields yielding up to 8 t ha^{-1} of rice with zero N input. This could be the results of residual N from the preceding crop or fallow. Less N available may contribute to explain the lower rates of tillering under organic management. Conventional rice was sown about a week earlier (Julian day 121 vs. 128) on

average from 1992 to 2009 (Figure 4G), which translated to average minimum temperatures during the first 10 days after sowing that were more than 1 °C higher under organic management (11.9 vs. 13.2 °C) (Figure 4H). Rice yields were strongly depressed when weed biomass at harvest was above 4 t ha⁻¹, but low yields (3 t ha⁻¹ or below) were also observed in relatively weed-free fields (Figure 4I). While the majority of fields under conventional management exhibited less than 2 t ha⁻¹ weed biomass, fields under organic management could produce as much as 10 t ha⁻¹ weed and no rice yield.

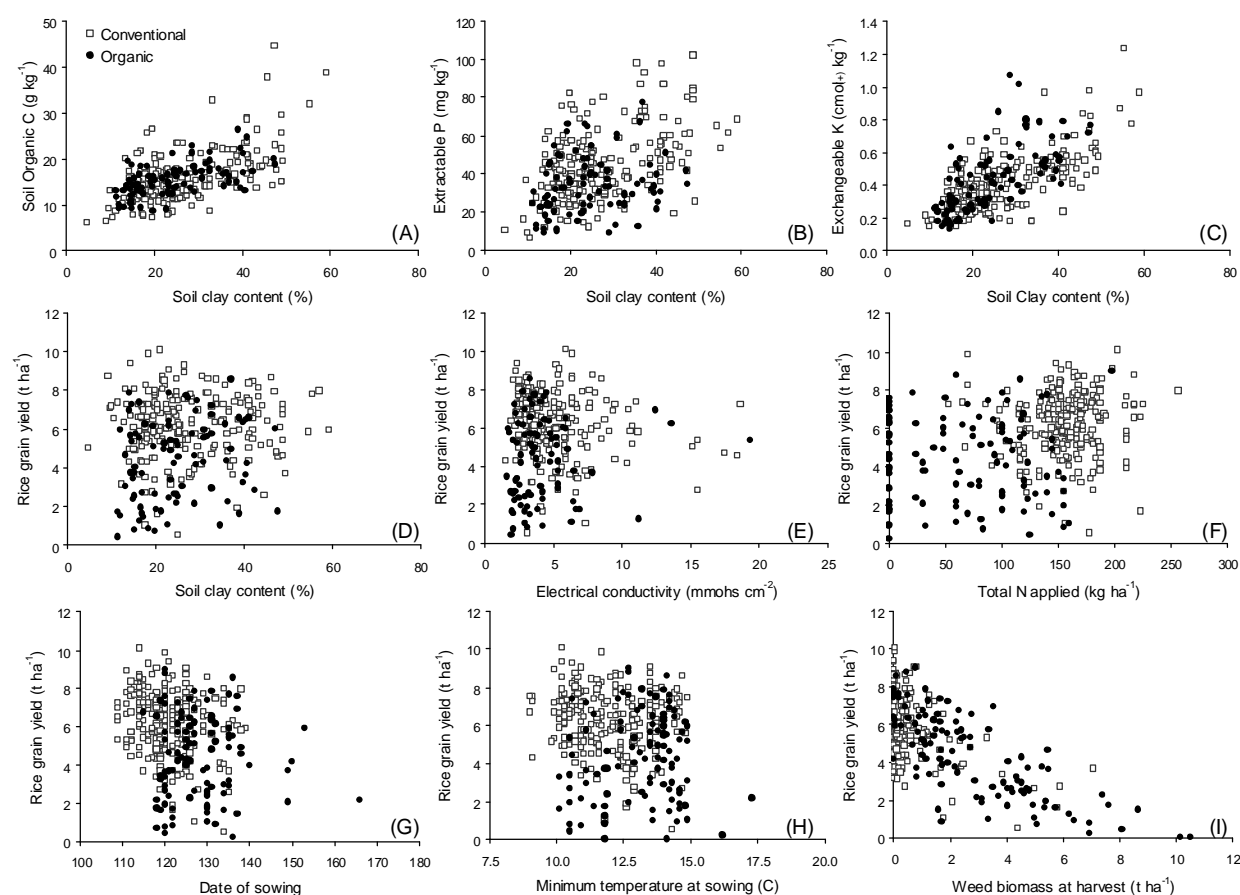


Figure 4: The relationship between soil clay content and soil fertility attributes: (A) soil organic C, (B) extractable P and (C) exchangeable K for conventional and organic rice fields. Rice grain yields plotted against (D) soil clay content, (E) electrical conductivity, (F) applied N, (G) sowing dates, (H) average minimum temperatures during the 10 days after sowing and (I) weed biomass at harvest under conventional and organic management.

3.2 Categorising overall variability

The descriptive analysis illustrates the complexity of the data structure, and the need to categorise the variability arising from multiple interactions between variables. A first classification and regression tree done on the entire dataset ($n = 351$, conventional and organic), and having grain yield as the target variable, identified weed biomass at harvest as the main factor explaining yield variability (Figure 5A). Fields with more than 2.8 t ha^{-1} weed biomass (Group 2, $n = 51$) produced an average rice grain yield of 2.4 t ha^{-1} , and they were further split by the rate of tillering: Rice stands that bore more than $1.9 \text{ panicles plant}^{-1}$ produced on average 4.7 t ha^{-1} rice grain (Terminal node 8, only 4 observations). Similar interpretations could be derived following the various ‘branches’ of the tree. The highest yields (7 t ha^{-1} , on average) were obtained in fields that had less than 0.8 t ha^{-1} weed biomass and more than 1.3 g kg^{-1} total soil N, and that corresponded to a certain list of rice varieties (Terminal node 3, $n = 138$). Both weed biomass and the rate of tillering have multiple threshold values that reappear as splitting criteria, indicating a pluri-modal distribution of these variables. Rice variety and total soil N only appear as splitting criteria at the end of the tree.

Based on these results, a classification and regression tree was done with weed biomass at harvest as the target variable (Figure 5B). The binomial variable indicating the type of management system, conventional vs. organic was the main criterion used to categorise variability in weed biomass at harvest. Fields under conventional management were treated with herbicides. They had an average weed biomass of 0.4 t ha^{-1} and were further split by the stand density of rice at emergence. Organic rice fields had an average weed biomass of 2.9 t ha^{-1} and were further categorised by the rate of tillering, the stand density at emergence (a higher threshold than under conventional) and the date of sowing. Under organic management, the fields with the least weed biomass were those that achieved more than $187 \text{ plants m}^{-2}$ at emergence and were sown after 2nd May (Terminal node 6, $n = 61$). Weed biomass at harvest is not an entirely independent variable from rice yield. They co-vary in different ways. Factors such as soil nutrient availability may have a positive impact on the growth of both, rice and weeds, while factors that favour one of them may proportionally depress the other. Soil seed banks of weed species are also highly variable in space and depend to a large extent on previous management of the fields.

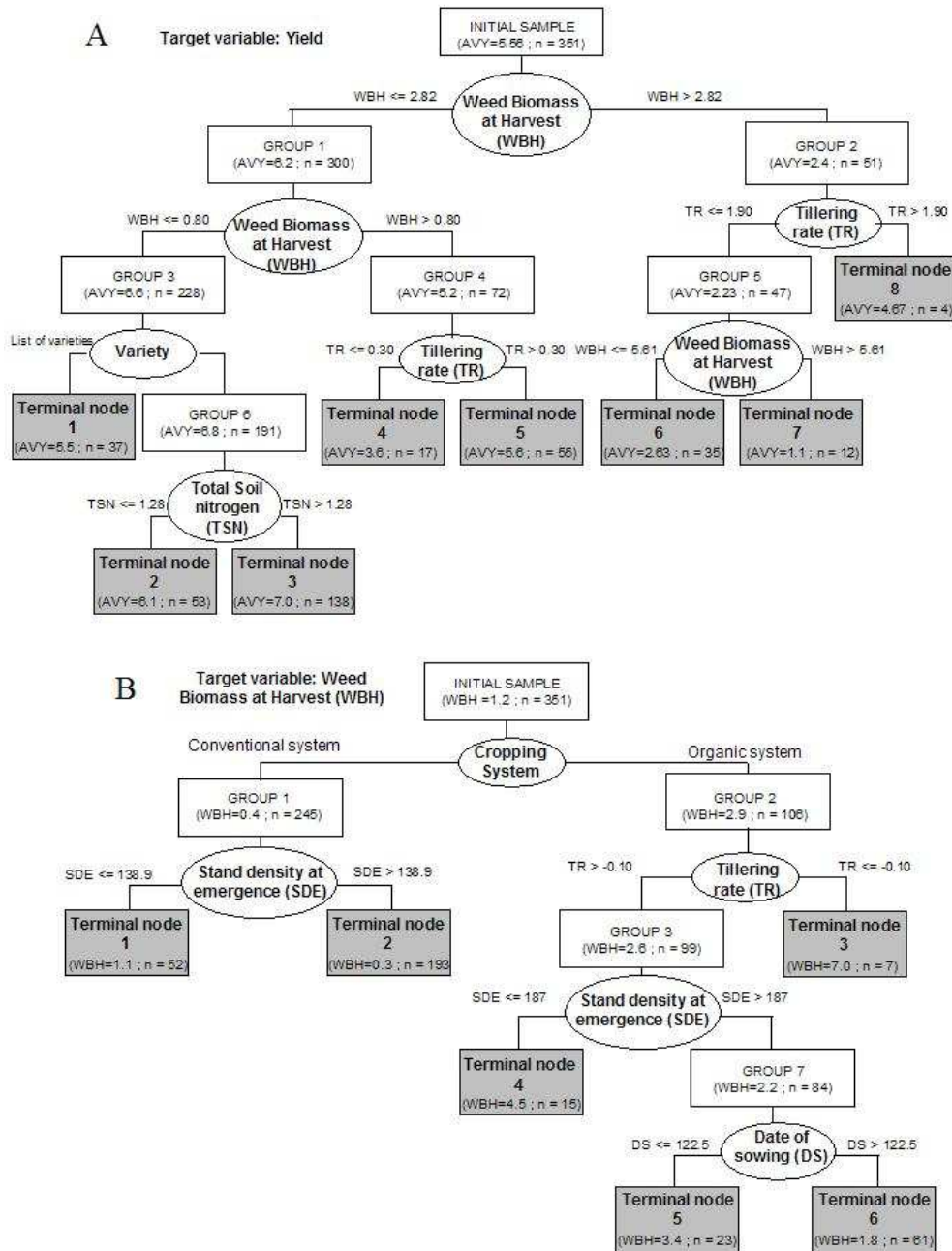


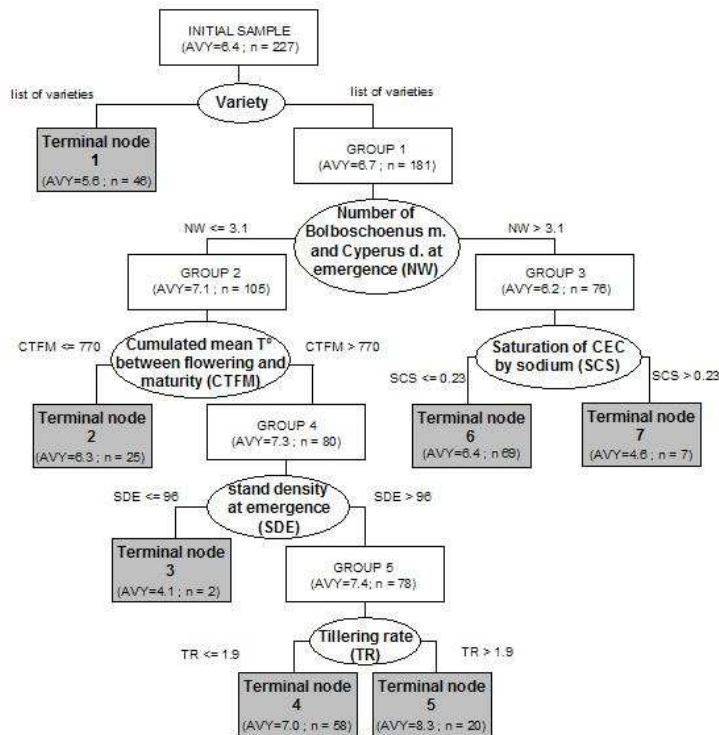
Figure 5: Classification and regression tree models to describe rice grain yield (A) and weed biomass at harvest (B) as a function of variables describing soil and climate conditions as well as agronomic practices. In square boxes are the groups of data, group 0 (Initial Sample) being the complete data base, and groups 1 to 8 being the resulting subgroups after the identification of a variable that split the data in two groups (splitting node, in round boxes). Each splitting variable is associated to a threshold value in its own units that separate the larger group of data in two subgroups, in the case of qualitative or discrete variable this threshold can be a list of values such as list of varieties dividing the terminal node 1 and the group 6. In the square box of (A), the AVY value is the Average Yield of the group and the n value correspond to the number of observation contained in that group. In (B), WBH is weed biomass. The list of varieties in (A) is : 17, 19, 20, 26, 28, 31, 32, 42, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 7, A. The varieties' names corresponding to the previous codes are in appendix A.

3.3 Yield variability under conventional and organic management

The analyses indicate conventional and organic rice fields should be assessed separately. Having studied its influence and its variability, weed biomass at harvest was removed as an explanatory variable, and the 18 fields that were severely infested with weeds under conventional management ($> 2.5 \text{ t ha}^{-1}$ weed biomass at harvest – Figure 4I and 5A) were removed from the database. A classification and regression tree for rice yield on the remaining 227 conventionally managed fields yielded a tree with the following variables as splitting criteria, in order of importance: variety, number of *Cyperaceae* weed species at emergence, thermal sum between emergence and maturity, Na^+ saturation of the cation exchange capacity (CEC), stand density and tillering rate (Figure 6A). The average yield of this sub-sample of fields ($n = 227$) was 6.4 t ha^{-1} and about 0.4 t ha^{-1} above the regional average. The highest yields ($7.0 - 8.3 \text{ t ha}^{-1}$) were obtained with more than 96 rice plants and less than 3 weed plants per m^2 at emergence, after accumulating more than 770 degree days (base temperature of 13°C), and with tillering rates smaller (Terminal node 4, $n = 58$) or greater (Terminal node 5, $n = 20$) than 1.9. Poorer yields were observed in weed-infested and Na^+ saturated soils (Terminal node 7, $n = 7$).

Having removed weed biomass at harvest as an explanatory variable, rice yield variability under organic management was categorised in eight groups through the following criteria, in order of decreasing importance: presence of the weed *Echinochloa crus-galli* and rice stand density at emergence, tillering rate and levels of exchangeable K in the soil (Figure 6B). As in the case of conventional management, the variety of rice planted was a criterion to categorise yield variability. The analysis separated lists of well and poorly yielding varieties, particularly in the presence of *Echinochloa*. The lists of poorer yielding varieties did not exhibit any apparent common trait (e.g., length of cycle, plant architecture, origin, etc.) that could be ascribed to poorer yields in the presence of this weed. The group of organically managed fields infested with *Echinochloa* yielded almost half that of fields free of this weed and exhibited 4.1 t ha^{-1} weed biomass, against 1.5 t ha^{-1} in group 2. When fields were infested with *Echinochloa* certain varieties seemed to outcompete this weed better (group 3 vs. group 4), and the stand density of rice at emergence played an important role in the crop competitive ability. The highest yields corresponded to *Echinochloa*-free fields in which tillering rates were greater than 0.26.

A Target variable: Yield of conventional system



B Target variable: Yield of organic systems

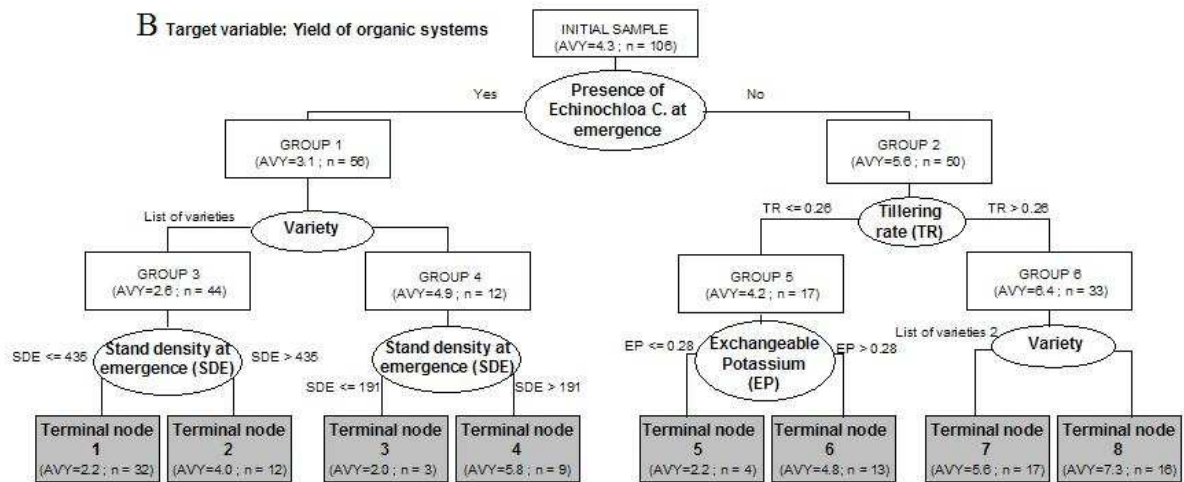


Figure 6: Classification and regression tree model to describe yield of conventional systems (A) and of organic systems (B) as a function of variables describing soil and climate conditions as well as agronomic practices. AVY is average yield in $t\ ha^{-1}$. The list of varieties in (A) is 17, 19, 25, 31, 32, 42, 45, 46, A. The list of variety one in (B) is: 1, 18, 20, 23, 25, 26, 28, 29, 47, 48, 49, 7. The list of variety two in (B) is: 1, 18, 20, 23, 24, 26, 28, 29, 47, 48, 49, 50, 51, 7. The varieties names corresponding to the previous codes are in appendix A. See the legend of Figure 4 for explanation of the regression tree.

3.4 Management strategies to reduce productivity gaps

Differences in yield and yield variability between the classification and regression clusters were not always explainable by considering the splitting criteria alone (Figure 6 A and B). In cases, the splitting criteria might appear as a surrogate for variables not appearing in the final tree. This could be the case of tillering rate (number of tillers per plant) and N availability, which are known to be correlated. Table 2 A and B show, for each of the clusters obtained for conventional and organic rice fields, the average values and the confidence interval of a series of common explanatory variables used in practice. Highest yielding rice fields under conventional management were in terminal node (TN) 5, which grouped fields with high carbon content and low Na⁺ saturation (Table 2A). Stand densities at emergence were less than 200 plants m⁻², emerging under average minimum air temperatures of 11.2 °C, but exhibiting tillering rates as high as 2.8. We did not include sowing density in this analysis because it did not vary (while emergence varied greatly), most fields were sown with 220 kg of seeds ha⁻¹. The frequency of rice as preceding crop was the lowest in this cluster, implying more frequent crop rotation. Fields on the same soil type produced smaller yields when the frequency of rice after rice was more than 90% (TN 4 and TN 6). Other management practices were rather homogeneous across clusters. Lowest yields under conventional management were in TN 7 and in TN 1 which corresponded to fields lying on saline-sodic and saline soils, respectively.

Comparing the lowest and highest yields observed in conventional systems, in fields without salinity problems (TN1 and TN5 respectively) suggest that best yields were obtained with early sowing (Figure 7 A) and low temperatures after sowing. The average clay content of soils of the fields in TN5 is high and average fertilizer application is 150 kg N ha⁻¹. As a result, plants produced more tillers, and the main yield component that differed between TN1 and TN5 was the number of panicles per square meter. The fact that the stand densities at emergence were higher for the low yielding TN1 cluster is counterintuitive. Different tillering rates between both clusters may result from varying soil fertility or irrigation water management. These results indicate that for conventional rice production the yield gap due to factors not yet fully understood would be about 2.7 t ha⁻¹ (average yield difference between TN5 and TN1). The boundary lines in Figure 2 A and D suggest a yield potential of about 10 t ha⁻¹, in line with previous modelling-based assessments (Delmotte et al., 2010a), which differs by 1.7 t ha⁻¹ with respect to TN5 and by 4.4 t ha⁻¹ for TN1.

A	Yield					Climate & Soil conditions							Practices					
	Yield (t ha ⁻¹)	Stand density at emergence (pl m ⁻²)	Spikes number at harvest (per m ²)	Tillering rate	Crop Harvest index	Minimum temperature at sowing (°C)	Cumulated mean T between flowering and maturity(°C)	Global solar radiation between sowing and flowering (J m ⁻²)	Clay content (%)	Organic matter (% of dry weight)	Electric conductivity (µ siemens)	Saturation of the CEC by sodium	Frequency of rice as a preceding crop	Date of sowing (julian days)	Total nitrogen applied in fertilizers (kg ha ⁻¹)	Weed biomass at harvest (t ha ⁻¹)		
<p>Number of Bolboschoenus at emergence</p> <p>Cumulated mean Temperature between flowering and maturity</p> <p>Stand density at emergence</p> <p>Tillering rate</p> <p>Variety</p>	TN7	4.6 +/- 1.1	181 +/- 90	329 +/- 81	1.4 +/- 1.2	0.51 +/- 0.03	12.6 +/- 0.9	895 +/- 83	74399 +/- 5992	22 +/- 4.3	1.8 +/- 0.3	1060 +/- 331	0.45 +/- 0.2	*	122 +/- 2	156 +/- 12	0.4 +/- 0.3	
	TN6	6.4 +/- 0.3	264 +/- 36	550 +/- 41	2.1 +/- 0.7	0.49 +/- 0.02	12.2 +/- 0.4	871 +/- 25	78283 +/- 3856	28 +/- 2.7	3.2 +/- 0.5	458 +/- 48	0.05 +/- 0.01	0.90	121 +/- 2	155 +/- 7	0.2 +/- 0.1	
	TN5	8.3 +/- 0.4	188 +/- 25	693 +/- 80	2.8 +/- 0.4	0.49 +/- 0.02	11.2 +/- 0.6	894 +/- 35	75235 +/- 5632	27 +/- 4.9	3 +/- 0.4	537 +/- 167	0.07 +/- 0.03	0.60	119 +/- 3	153 +/- 20	0.2 +/- 0.2	
	TN4	7 +/- 0.3	327 +/- 41	539 +/- 46	0.8 +/- 0.1	0.51 +/- 0.01	11.7 +/- 0.4	902 +/- 20	79056 +/- 2820	28 +/- 2.9	2.9 +/- 0.3	417 +/- 46	0.04 +/- 0.01	0.93	120 +/- 2	158 +/- 8	0.2 +/- 0.1	
	TN3	Only 2 data concerned, no average calculated																
	TN2	6.3 +/- 0.5	227 +/- 45	570 +/- 68	1.9 +/- 0.4	0.46 +/- 0.03	11.8 +/- 0.6	724 +/- 15	63852 +/- 3320	29 +/- 3.7	2.8 +/- 0.3	518 +/- 77	0.07 +/- 0.03	0.88	119 +/- 3	157 +/- 13	0.1 +/- 0.1	
	TN1	5.6 +/- 0.3	265 +/- 36	463 +/- 48	1.1 +/- 0.4	0.49 +/- 0.02	11.9 +/- 0.3	868 +/- 31	76492 +/- 2634	24 +/- 3	2.6 +/- 0.2	579 +/- 117	0.11 +/- 0.04	0.83	122 +/- 1	154 +/- 8	0.3 +/- 0.1	
B	Yield					Climate & soil conditions				Practices								
	Yield (t ha ⁻¹)	Stand density at emergence (plant m ⁻²)	Duration of the vegetative period (julian days)	Tillering rate	Grain sterility (%)	Crop Harvest Index	Minimum temperature ten days after sowing (°C)	Clay content (%)	Organic matter (% of dry weight)	Potassium content (Cmol(+) kg ⁻¹)	Frequency of rice as a preceding crop	Date of sowing (julian days)	Quantity of seeds sown (kg ha ⁻¹)	Total nitrogen applied in fertilizer (kg ha ⁻¹)	Number of Echinochloa c. at emergence (/m ²)	Number of Bolboschoenus m. and Cyperus d. at emergence (/m ²)	Weed biomass at harvest (t ha ⁻¹)	
<p>Standing density</p> <p>Rice cultivar</p> <p>Standing density</p> <p>Presence of Echinochloa c. at emergence</p> <p>Exchangeable potassium</p> <p>Tillering rate</p> <p>Variety</p>	TN1	2.2 +/- 0.5	268 +/- 33	91 +/- 2	0.3 +/- 0.1	15 +/- 5	0.46 +/- 0.04	13.1 +/- 0.3	22 +/- 3	2.7 +/- 0.3	0.4 +/- 0.1	0.34	127 +/- 3	235 +/- 13	83 +/- 19	63 +/- 46	132 +/- 75	4.6 +/- 0.8
	TN2	4 +/- 1.1	662 +/- 174	90 +/- 7	0.1 +/- 0.2	20 +/- 12	0.43 +/- 0.08	13.2 +/- 0.6	24 +/- 5	2.8 +/- 0.3	0.4 +/- 0.1	0.17	133 +/- 8	251 +/- 26	64 +/- 27	18 +/- 14	245 +/- 206	3.6 +/- 1.5
	TN3	2 +/- 0.4	159 +/- 26	95	0.3 +/- 0.1	21 +/- 18	0.49 +/- 0.03	12.0	38 +/- 2	3.8 +/- 1.3	0.5 +/- 0.1	--	122 +/- 4	213 +/- 26	81 +/- 79	12 +/- 18	247 +/- 349	6.2 +/- 1.2
	TN4	5.8 +/- 1	339 +/- 65	93 +/- 2	0.8 +/- 0.6	20 +/- 7	0.5 +/- 0.03	12.3 +/- 0.9	29 +/- 7	2.9 +/- 0.4	0.5 +/- 0.2	0.00	124 +/- 4	226 +/- 11	56 +/- 40	3 +/- 2	85 +/- 88	2.4 +/- 1
	TN5	2.4 +/- 2.3	437 +/- 38	91 +/- 8	-0.1 +/- 0.1	6 +/- 2	0.43 +/- 0.12	12.8 +/- 2.2	16 +/- 3	2.2 +/- 1	0.2 +/- 0.1	--	126 +/- 8	234 +/- 17	19 +/- 19	0 +/- 0	356 +/- 355	2.9 +/- 2.4
	TN6	4.6 +/- 0.8	467 +/- 84	88 +/- 5	0.1 +/- 0	14 +/- 4	0.5 +/- 0.02	13.3 +/- 0.8	25 +/- 4	2.6 +/- 0.3	0.5 +/- 0.1	0.08	130 +/- 4	230 +/- 14	71 +/- 23	0 +/- 0	221 +/- 142	1.9 +/- 0.8
	TN7	5.6 +/- 0.3	234 +/- 28	94 +/- 4	0.8 +/- 0.2	15 +/- 3	0.51 +/- 0.01	14.1 +/- 0.4	29 +/- 4	2.7 +/- 0.2	0.6 +/- 0.1	0.29	130 +/- 2	216 +/- 7	50 +/- 22	0 +/- 0	48 +/- 27	1.5 +/- 0.6
	TN8	7.2 +/- 0.5	386 +/- 52	84 +/- 3	0.8 +/- 0.3	17 +/- 6	0.52 +/- 0.02	13.2 +/- 0.7	22 +/- 4	2.5 +/- 0.2	0.3 +/- 0.1	0.19	128 +/- 4	225 +/- 11	90 +/- 27	0 +/- 0	30 +/- 28	0.8 +/- 0.4

Table 2: Average values and confidence interval (at 95%) of selected climate, soil and management variables for each terminal node under conventional (A) and organic (B) management.

Under organic management, average yields and yield variability differed more strongly between the clusters obtained through classification and regression than under conventional management. Yields ranged from 2 to 7 t ha⁻¹, coefficient of variations from 6 to 95% (Table 2B). Variability was observed in yield components, soil quality, management practices and weed infestation. Clusters differed in stand densities at emergence, tillering rates and percentage of grain sterility. Some clusters grouped soils with high (38%) and with relatively low (16%) clay contents, consequently varying in soil organic C contents. In all clusters of fields under organic management the average frequency of rice in the rotation was less than 30%, there was a range of 11 days between the average earliest and latest sowing dates, and N application rates varied from 20 to 90 kg ha⁻¹. Yields with high infestation with *Echinochloa* (TN 1 to 3) tended to exhibit greater grain sterility and the highest weed biomass at harvest; as this weed develops late in the season, competition takes place mainly between rice flowering and grain filling. The best yields were obtained on soils with average soil C and exchangeable K⁺ contents, no excess salinity or sodicity, in fields with less than 0.8 t ha⁻¹ weed biomass, no *Echinochloa* and few *Cyperaceae* weeds at emergence, and in fields that received a relatively high N application rate as organic fertiliser (TN 8). The lowest yields were obtained on clayey soils with no salinity or sodicity problems, with sparse rice stand densities but dense weed densities at emergence, leading to more than 6 t ha⁻¹ weed biomass at harvest (TN1).

For TN1 the pressure of weeds was high already at emergence, as shown by the number of *Echinochloa* per square meter (Figure 7 B). The key for success under organic management, in regard of TN8, would be a high stand density at emergence, obtained by delaying the sowing date to ensure higher temperatures for rice emergence. This may compensate the lower tillering rates associated with lower fertiliser application rates under organic management. The yield difference between TN1 and TN8, which can be largely attributed to weed competition, was about 5 t ha⁻¹. With respect to the reference yield potential of 10 t ha⁻¹ (Figure 2 A), the yield gap due to weeds and other factors in organic systems ranged from 2.8 t ha⁻¹ to 7.8 t ha⁻¹.

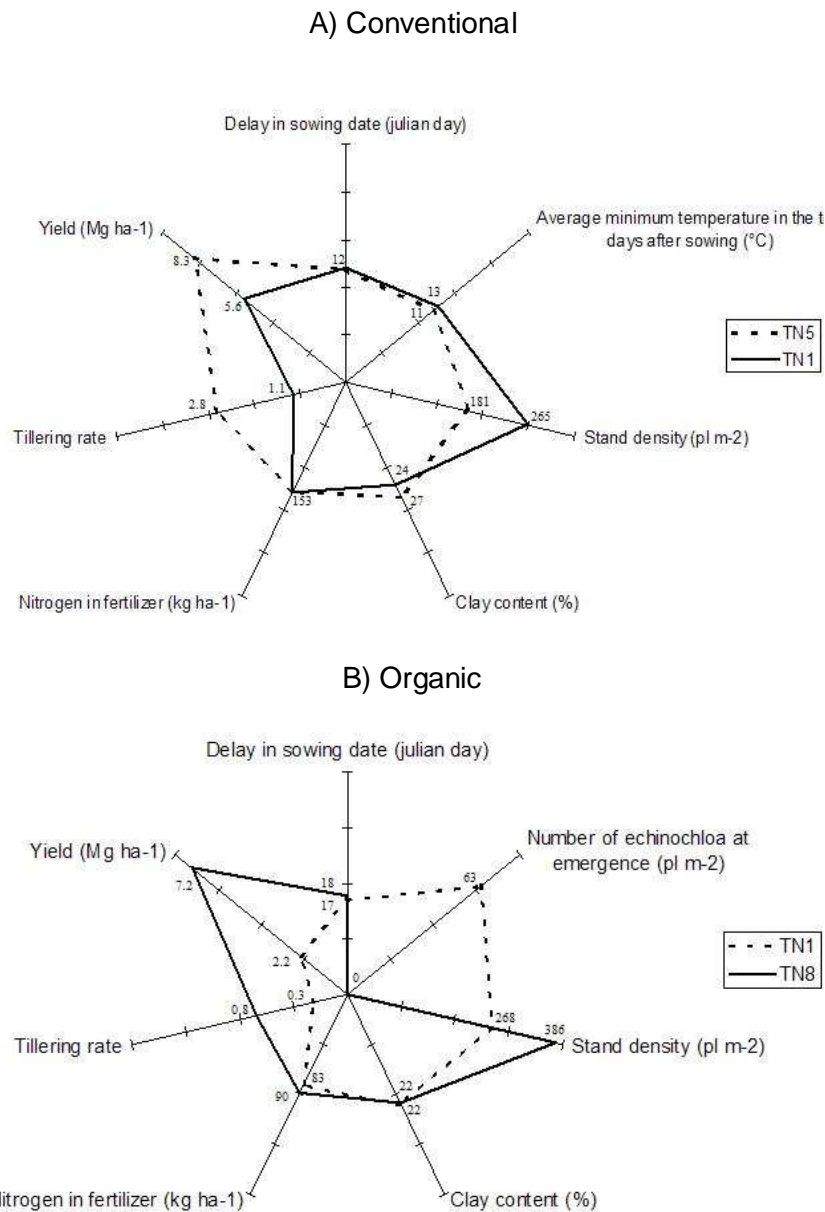


Figure 7: Spider diagrams representing the yield and the main factors discriminating the lowest and highest yield of conventional (A) and organic (B) systems. In (A) the TN1 was chosen instead of TN7 for the lowest yield due to specific issue of sodicity of TN7.

Differences appeared when comparing the best yield under conventional versus organic management (Figure 8). Sowing dates were delayed under organic management (Table 2 A and B), which may explain the higher rice stand densities at emergence. Tillering rates were lower under organic than in conventional management, which is consistent with the fact that the quantity of nitrogen applied in organic systems is nearly half of that applied under conventional management. Finally, clay contents were on average lower in soils under organic management. This is due to the fact that organic rice tends to be grown in upland soils without salinity problems, as the frequency of irrigated rice in the rotation will not be

sufficient to desalinate the soil. For the best yielding fields under both conventional and organic management, the average productivity gap was about of 1.1 t ha⁻¹.

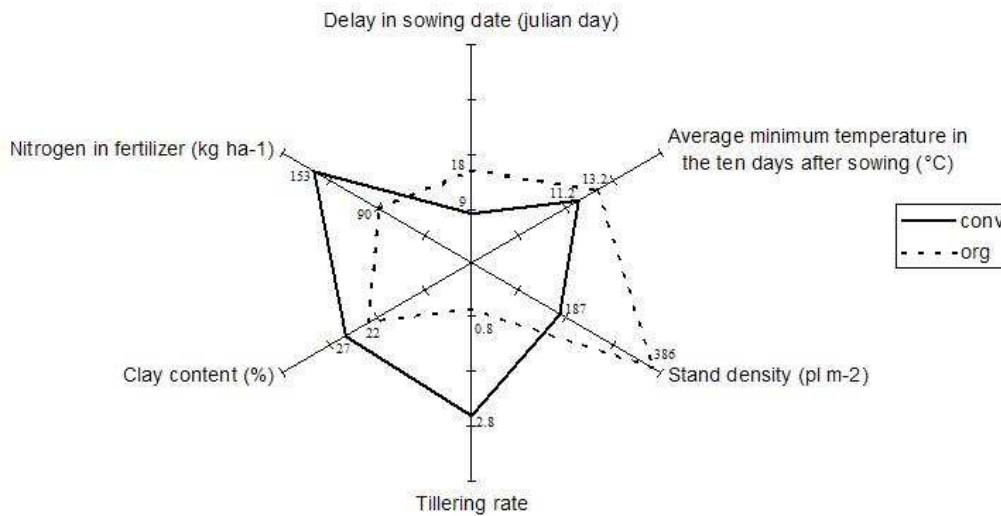


Figure 8: Spider diagram comparing the best TN of conventional (TN5) and organic (TN8) systems. The yield difference is 1.1 t ha⁻¹, however the value of the presented variable are greatly different and show two different strategies to achieve high yield.

4. Discussion

Most of the current scientific knowledge and management recommendations available for Mediterranean rice are almost entirely restricted to conventional management. This study aims to guide the design of ecologically intensive cropping systems, drawing inspiration from current strategies practiced by farmers that grow organic rice. The analysis of data collected on more than 350 fields over more than 15 years showed a large variability of rice yields, which was greater under organic management. For both organic and conventional cropping systems the strongest driver of yield variation was weed pressure (Figure 4 I), even though the latter received an average of three herbicide applications per season. Rice yields under conventional management ranged from 4 to 8 t ha⁻¹; after removing the fields with severe salinity problems yields varied from 6 to 8 t ha⁻¹. This variability remains difficult to explain due to the relatively small range of variation in the explanatory variables under conventional management. While soil type may contribute to explain part of it (Figure 4, Table 2 A), relatively homogeneous management among conventional farmers tends to mask the impact of this variability. Besides weed competition, factors such as soil type, the date of sowing and the stand density at emergence played an important role under organic management (Table 2 B). When weeds were controlled successfully, yields of organically grown rice varied between 5 and 7 t ha⁻¹.

Comparing organic and conventional systems shows different crop management strategies (Figures 7 and 8). In both cases, the number of panicles at harvest was the main yield component to be affected (Figure 2). At such high latitudes, low temperatures at sowing affected initial stand densities and, in soils with moderate fertility receiving small amounts of N fertiliser, the rate of tillering might be insufficient to reach the required number of panicles to maximize yield. Late sowing allows low temperatures (below 13°C) to be avoided thereby improving germination. Under conventional management there was little variation in sowing dates, while under organic management they were more variable and often delayed. These differences, that may be relevant for other rice growing areas at high latitude, could be explained as follows:

- Weed management and soil preparation take more time under organic than conventional management due to the use of mechanical weeding and ‘false’ sowing to prompt weed emergence before rice sowing;
- The aim of a high stand density under organic management from purposely sowing late, to allow more rapid soil cover by rice to reduce weed competitions.
- Under conventional management the use of herbicides and N fertilizer to promote tillering are the main agronomic practices that limit weed competition.

Lower N application rates under organic management (Figure 4 F) are associated with limited availability of farmyard manure produced in the region, the higher price of organic fertiliser compared with mineral ones, and the fact that higher risks of weed infestation under organic management discourage farmers to invest in organic fertilizers. The frequency of rice as a preceding crop for organic rice is far lower than under conventional management (Tables 2 A and B). The return time of rice in the rotation is often longer under organic management, due to the need to break weed cycles by growing rainfed crops. Weed competition is a major challenge for organic rice production in the region, as well as to organic farming in general worldwide (see later). Legumes (i.e. alfalfa) are sometimes introduced in the rotation under organic management, although market opportunities often limit this practice. Farmers take into account N inputs from biological fixation to determine the quantity of organic fertilizer to apply, which explains the lower N fertilisation rates observed in organic systems. It is clear that due to the low tillering rates expected under organic management it is important to ensure sufficient stand density at emergence to outcompete weeds.

To our knowledge, no other analysis has been conducted to understand long term yield variability in temperate rice, for both conventional and organic systems. Under comparable agroecological conditions, Casanova et al. (1999) found in two consecutive years in the Ebro delta in Northern Spain that the main factors affecting rice yields under conventional management were the CEC and soil salinity. The set of variables included in their analysis did not include any descriptor of weed pressure. They concluded that the yield gap between actual and attainable yield was about 3 t ha⁻¹. Our results show comparable productivity gaps, notably for conventionally managed fields. However, only a few fields exhibited salinity problems in our case, where weeds were a more important factor determining yield and yield variability. In the Po valley of Italy, Ferrero et al. (2007) considered that weeds were ‘the worst noxious organism for rice’ and estimated that without weed control, 90% of the yield could be lost. Our study included the main factors affecting rice yields, however important factors known to determine yield variability were not included in our database, notably those related to irrigation management such as the depth and dynamics of the irrigation water and its effects on temperature (Confalonieri et al., 2005).

Organic and conventional systems are often compared in long term on-station experiments. For example, Eltun et al. (2002) and Ford Denison et al. (2004) reported rainfed cereal yields 35% lower under organic versus conventional management, Posner et al. (2008) reported only 10% maize, soyabean and winter wheat yield differences in favour of conventional management, while Cavigelli et al. (2008) found 24 to 41% lower maize yields under different organic management schemes. The main factors affecting yield in these studies was first N availability and then weed control. Weed competition was identified as the main factor affecting wheat yields by (Kaut *et al.*, 2008). Weed competition is specially severe under low N availability, and changes in weed species composition may be induced after long term organic management (Lundkvist et al., 2008).

One of the outcomes of yield variability analysis is to be able to rank the variables depending on their capability to explain yield variability. For example, Casagrande et al. (2009) analysed the factors influencing grain protein content in wheat using mixed-models. This method is difficult to implement to analyse our data, which exhibits numerous missing values and both discrete and continuous variables. The same is true for classical regression analyses, which are often abused or over-interpreted in agronomic research (Webster, 1997). Classification trees were used here to categorise groups of observations that are homogeneous in terms of target and driving variables. The confounding effect of inter-correlated explanatory variables

highlighted by Bakker et al (2005) is not necessarily solved with the method we used, but correlations were made more explicit than under regression analysis. The effects of temporal and spatial variability should also be distinguished, as pointed out by Reidsma et al (2009). We chose to consider all the entries of our database as independent observations, using indicators of climatic variability as explanatory variables (it should be noticed that, for irrigated rice, rainfall plays a minor role; the role of temperature was captured in our analysis) thereby accounting for temporal variability.

Organic rice production has had an exponential development since the early 21st century in Camargue. However, it seems that at present it has stagnated due either to uncertain economic conditions or production risks. At the field scale, recommendations for conventional production are done by a technical research centre (i.e. the French Rice Centre) that provides farmers with advice. In contrast, for organic rice production, there is little knowledge of the technical means to reach acceptable yield levels and notably on the reliability of the different cropping systems. Our analysis of the causes of yield variability has identified key questions that need to be answered to develop ecologically intensive systems acceptable to farmers. Alternatives such as growing rice only after a rainfed crop and/or a legume may contribute to reduce weed pressure (Lundkvist et al., 2008; Lopez Ridaura et al., 2010). Further research should be directed to develop prototypes that combine such alternatives, some of which are already practiced in temperate rice cultivation such as in California (US) (Hill et al., 2004) or in southern Spain (Aguilar-Portero, 2004). Taking into account the need to sow late, the development of short cycle rice varieties may be necessary for organic production in high latitudes. This would reduce the length of the cropping season, and allow late sowing without increasing the risk of cold stress and sterility at flowering. Current research in the region aims at engaging farmers in prototyping cropping systems through design and evaluation of alternative management practices, identifying the main obstacles at different scales and possible actions for their development (Delmotte *et al.*, 2010a). The results of this study indicate how farmer innovations may lead the way towards the ecological intensification of agriculture, particularly aiming at reducing the use of pesticides.

5. Acquisition et formalisation de dire d'experts

Mis à part pour le riz (§4 de ce chapitre), nous ne disposons pas de base de données permettant d'analyser les facteurs de variabilités du rendement des cultures en Camargue. Pour le blé-dur, nous avons dans un premier temps essayé d'utiliser les modèles de culture développés dans d'autres projets de recherche. Cependant les résultats obtenus nous ont conduits à chercher d'autres sources de données. Ces résultats sont détaillés dans le paragraphe 6 de ce chapitre.

La description des itinéraires techniques réalisées à partir des enquêtes en exploitation et rapportée dans les paragraphes 2 et 3 de ce chapitre, a permis de caractériser les itinéraires techniques des cultures principales ou plus rares, mais qu'au moins un agriculteur cultivait en Camargue : le riz, le blé, la luzerne, le tournesol, le colza et la lentille. Pour les cultures dites « alternatives », c'est à dire qui ne sont pas cultivées en Camargue à notre connaissance, il était impossible de formaliser les itinéraires techniques par enquête. Dans ce cas, il est souvent fait appel à des experts qui, de par leurs connaissances, peuvent aider à la formalisation des connaissances sur les systèmes agricoles (Kropff *et al.*, 2001; Sterk *et al.*, 2007; Doré *et al.*, 2011; Giller *et al.*, 2011).

Dans les paragraphes suivants, nous rapportons comment nous avons associé des experts pour l'acquisition, la formalisation et la vérification des données.

5.1. Démarche suivie

Les experts ont été associés pour la réalisation de deux tâches principales : (i) la définition et la vérification des itinéraires techniques détaillés pour chaque activité agricole ; (ii) l'estimation des rendements de chacune de ces activités.

Lors de l'analyse des enquêtes sur les itinéraires techniques (cf. §2), un expert en riziculture (J.-C. Mouret) a été associé à la formalisation de tous les itinéraires (conventionnels et biologiques, intensifs ou simplifiés, et en fonction des différents précédents) des différentes activités basées sur le riz. Le choix de chaque opération a été discuté et validé pour chaque activité afin d'obtenir des itinéraires techniques cohérents.

Pour les itinéraires techniques des cultures en agriculture biologique, le CIVAM Bio de l'Aude (Max Haefliger) a mis à notre disposition des données sur les itinéraires techniques pratiqués dans le sud de la France. Ces données ont été confrontées aux données dont nous disposons pour les cultures présentes en Camargue.

En ce qui concerne les itinéraires techniques des autres cultures pour lesquels nous disposons d'enquêtes, nous avons formalisé, suivant les cas, un ou plusieurs itinéraires qui ont été

soumis à un expert des systèmes de culture méditerranéens (Stéphane Jezequel – Arvalis Institut du Végétal) lors d'une première réunion de travail. Lors de cette réunion, les méthodes utilisées pour calculer les différents indicateurs (choix des outils et tracteurs, temps de travail de chaque opération, carburant consommé, coûts des intrants et coûts de mécanisation) ont été discutées. De nombreuses informations ont été mises à notre disposition et des modifications dans les itinéraires présentés ont été proposées par l'expert. Des documents techniques édités par Arvalis – Institut du Végétal ont également été utilisés pour formaliser des itinéraires techniques pour lesquels nous ne disposons pas de données. Une seconde réunion a eu lieu où chaque itinéraire, conventionnel et biologique a été passé en revue et les calculs des indicateurs comparés aux données et calculs réalisés par l'expert.

En ce qui concerne les rendements, nous avons travaillé avec quatre experts :

- Pour les rendements des activités basées sur le riz, nous avons appliqué les pertes de rendement identifiées dans le paragraphe 4 aux rendements potentiels estimés par l'expert (Jean-Claude Mouret).
- Pour les systèmes en agriculture biologique, la Chambre d'Agriculture des Bouches du Rhône (François Martin) nous a fourni les références dont elle disposait pour la Camargue.
- Le CIVAM-Bio Aude nous a également fourni des références obtenues dans le Sud-Est de la France.
- Enfin, deux autres réunions avec Stéphane Jezequel ont permis de formaliser les rendements des autres cultures, en systèmes conventionnel et biologique, dans le cas où nous n'avions pas obtenu de valeur de référence auprès des experts précédemment cités. Au cours de ces réunions, nous avons dans un premier temps et pour chaque culture, identifié les principaux facteurs influençant le rendement. Puis, nous avons identifié l'activité, parmi la gamme définie, qui s'approchait le plus du rendement potentiel, et formalisé des pertes de rendement pour chaque activité. Pour certaines cultures, peu pratiquées et moins connues de l'expert (comme le soja ou la lentille), il n'y a que peu de valeurs de rendement différentes entre activités, du fait du manque de connaissance sur des facteurs faisant varier le rendement.

Toutes ces données ont été mises en forme dans une base de données sous Excel®. Chaque ligne représente une activité agricole, et chaque colonne un coefficient technique.

5.2. Exemple de résultats : rendements du blé-dur

A titre d'illustration de la démarche nous présentons les rendements du blé dur estimés par l'expert. Les rendements de cette culture ont été estimés pour 64 situations issues du croisement d'un mode de conduite (conventionnel), de deux types de précédents (sec et irrigué), de quatre types de sols, de deux niveaux d'intensifications et de quatre types d'années climatiques.

Nous avons fait le choix de ne distinguer que deux types de précédents (sec et irrigué), en considérant toutes les cultures sèches identiques en termes d'effet précédent. Or il est avéré que les légumineuses sont des précédents plus favorables pour la culture suivante qu'une culture sèche qui ne fixe pas d'azote. Afin de limiter la complexité des données, nous avons modifié les itinéraires techniques qui étaient définis pour chaque précédent, en réduisant la dose d'azote apportée dans l'itinéraire technique d'une culture après une légumineuse, pour que le rendement obtenu corresponde au rendement définis pour un précédent « culture sèche ».

Le tableau 5.2 présente les rendements estimés par l'expert pour quelques-unes des 64 situations considérées en agriculture conventionnelle. Pour chacune de ces situations, des éléments de justifications agronomiques de ces valeurs ont été formulées par l'expert pour expliquer les valeurs proposées. Ces résultats sont discutés dans la dernière partie de ce chapitre.

Tableau 5.2 : Rendements du blé-dur et cause de pertes de rendements définis à dire d'expert pour les itinéraires dits « intensifs » et pour un précédent sec.

Ces rendements sont détaillés pour 3 types de sol, 4 types d'années climatiques et deux types de précédents : précédent irrigué (riz) et précédent sec (blé-dur, tournesol etc.).

		Type d'année climatique (automne / printemps)			
Précédent sec		Humide/Humide	Humide/sec	Sec/Humide	Sec/Sec
Sol Argilo-limoneux bas (AB)	Rendement (t.ha ⁻¹)	3.8	3.8	6	6
	Explications agronomiques	Problèmes d'installation des cultures : semis tardif et densité de levée faible	Problème d'installation des cultures : semis tardif et densité de levée faible	Bonne installation des cultures, accès à l'eau de la nappe au printemps	Bonne installation des cultures, accès à l'eau de la nappe au printemps
Sol limono argileux haut (AH)	Rendement (t.ha ⁻¹)	4.2	3.4	6	4.2
	Explications agronomiques	Problèmes d'installation des cultures : semis tardif et densité de levée faible, mais meilleure que sur sol AB	Problème d'installation des cultures : semis tardif et densité de levée faible, stress hydrique au printemps	Bonne installation des cultures, racine moyennement profonde mais compensation par les pluies de printemps	Bonne installation des cultures, racine moyennement profonde limitant l'accès à l'eau de la nappe
Sol sableux haut (SH)	Rendement (t.ha ⁻¹)	4.7	3.4	3.4	3.4
	Explications agronomiques	Sol drainant, bonne installation de la culture, les pluies de printemps alimentent la culture	Bonnes installation de la culture, la mauvaise rétention en eau du sol pénalise la culture au printemps	Installation difficile de la culture en milieu drainant avec un automne sec	Installation difficile de la culture en milieu drainant avec un automne sec

6. Modélisation des systèmes de culture

Les modèles de culture sont des outils privilégiés pour la description des activités agricoles. Ils sont couramment utilisés dans les études portant sur la caractérisation des systèmes de culture du fait de leurs avantages majeurs :

- La possibilité de simuler un grand nombre de situations différentes une fois le modèle validé, et de fournir des indicateurs sur des phénomènes difficiles à mesurer.
- Ils permettent d'évaluer pour une situation donnée, le rendement moyen qu'il est possible d'obtenir, mais aussi sa variabilité, liée notamment aux variations du climat.
- La description précise et quantifiée des processus majeurs à l'origine de la variabilité des résultats obtenus.

Cependant, ils ont également des limites :

- Ils nécessitent pour leur construction un grand nombre de connaissances et de données expérimentales.
- Ils sont souvent difficiles à paramétrer pour les conditions d'une zone donnée, et le calibrage, ainsi que la validation du modèle, nécessitent un grand nombre de données dans une large gamme de situations pédoclimatiques.
- Ils ne prennent la plupart du temps pas en compte certains facteurs influençant le rendement, parmi lesquels la plupart des facteurs biotiques.

Comme indiqué dans la littérature (par exemple Belhouchette et al., 2011), nous souhaitons utiliser ce type de modèles pour compléter l'estimation du rendement de chaque activité par sa variabilité en fonction des sols et du climat. Ce travail a d'abord été entrepris en 2008 au travers de deux stages que j'ai encadrés (Kichou, 2009; Vay, 2009), le premier portant sur la modélisation des rendements du blé-dur et le second sur la modélisation des rendements du riz. Il a été poursuivi en 2011 par un nouveau travail sur la modélisation du rendement du blé-dur dans le cadre d'un autre stage (Abdelkrim, 2011). Dans cette partie 6 de ce chapitre, nous illustrons les difficultés rencontrés lors de l'usage de la modélisation à travers l'exemple du rendement du blé-dur. Nous reviendrons dans la discussion de ce chapitre sur les résultats obtenus.

6.1. Matériel et méthode : l'exemple du blé-dur

6.1.1. Choix d'un modèle

Parmi les modèles existants pour la simulation du blé-dur (par exemple CROPSYST, STICS, PHENIX, APES, APSIM), nous avons choisi d'en tester deux qui semblaient présenter quelques avantages :

- Le modèle APES (Donatelli et al., 2010), pour lequel nous pouvions disposer d'assistance en termes d'usage et de calibration et qui offrait *a priori* des possibilités de simulation de tous les types d'activités liées à la production végétale,
- Le modèle STICS (Brisson et al., 2003), pour lequel nous pouvions également disposer d'une assistance et qui a fait l'objet d'un travail conséquent de développement et de documentation spécifique au blé dur dans la région.

6.1.2. Acquisition de données pour le calibrage

Afin de paramétrer et d'évaluer les modèles, nous avons conduit en 2009 des suivis de six parcelles d'agriculteurs en Camargue ainsi que des suivis sur quatre parcelles expérimentales en agriculture biologique au domaine INRA de Mauguio (34). Nous avons également utilisé des données issues de suivis de parcelles en blé-dur en Camargue réalisés en 2010 et 2011 dans le cadre du programme de recherche ANR-Perfcom.

Sur ces parcelles, nous avons mesuré les variables suivantes :

- La densité de levée et le taux de tallage,
- L'indice de surface foliaire (LAI) à quatre dates au cours du cycle,
- La biomasse par type d'organe (tige, feuille et grain) à quatre dates au cours du cycle
- Le rendement et ses composantes à la maturité.

Des analyses de sols ont également été effectuées pour mesurer les principales caractéristiques nécessaires au paramétrage du modèle (granulométrie, pH, teneur en matière organique, en azote total et capacité d'échange cationique).

Enfin, l'ensemble des pratiques culturales mises en place par l'agriculteur ou par les agents de la station expérimentale ont été enregistrées.

6.1.3. Simulation de la variabilité du rendement du blé-dur en Camargue

La première évaluation d'APES et de STICS a consisté à paramétrer les modèles puis à essayer de les calibrer en modifiant plusieurs paramètres parmi lesquels l'efficience

d'utilisation de la lumière (Radiation Use Efficiency) et les coefficients de stress hydrique (pour le détail de ce travail, se reporter à Kichou (2009)). Il s'agissait d'une méthode de calibrage proposée et testée simultanément dans des recherches réalisées par l'UMR System dans le cadre du projet européen FP6-Seamless (Mahmood *et al.*, Submitted). Les résultats obtenus en 2009 (comparaison des données simulées et mesurées) ont conduit à choisir le modèle STICS pour continuer les études sur la modélisation du rendement du blé-dur (Kichou, 2009).

La thèse de Solenn Guillaume (2011) ayant porté sur le calibrage de ce modèle pour la simulation du rendement du blé-dur dans le sud de la France, nous avons obtenu les paramètres de calibrage proposés. Le modèle avec ces nouveaux paramètres a été dans un premier temps évalué au regard de 14 situations de culture du blé-dur en Camargue. Les résultats étant satisfaisants, des simulations ont été réalisées pour 17 années climatiques, et sur six sols différents reflétant la variabilité des sols camarguais (Abdelkrim, 2011).

6.1.4. Comparaison aux dires d'expert

Ces simulations ont été comparées aux dires d'expert pour chaque situation. Lors d'une réunion en présence de l'expert (Stéphane Jezequel, Arvalis), les différentes situations pour lesquelles les rendements simulés différaient fortement des rendements estimés à dires d'expert ont été analysées avec lui, ce qui a conduit à deux types de modifications :

- Des modifications concernant le paramétrage du modèle (activation des modules de macroporosité, décalage des dates de semis, nouveau classement des années climatiques, voir Abdelkrim, 2011).
- Un questionnement des dires d'expert lorsque les simulations faisaient apparaître des phénomènes physiologiques non pris en compte par l'expert (par exemple un stress azoté).

De nouvelles simulations réalisées après ces modifications ont permis d'améliorer les résultats, qui sont présentés succinctement dans la partie suivante et décrits plus en détail dans Abdelkrim (2011).

6.2. Résultat : simulation du rendement du blé-dur

L'étude de la variabilité du rendement du blé-dur dans les conditions camarguaises a conduit à la réalisation de plus de 306 simulations. Ces simulations ont été comparées aux valeurs de rendement proposées par l'expert. La moyenne et l'écart type des valeurs simulées ont été calculées, puisqu'il y avait plusieurs simulations (pour plusieurs années) là où l'expert ne

donnait qu'une valeur de rendement. La figure 5.1 présente la comparaison des rendements simulés et à dire d'expert. Les écarts restent importants malgré l'amélioration liée à l'activation du module de macroporosité de STICS et au décalage des dates de semis.

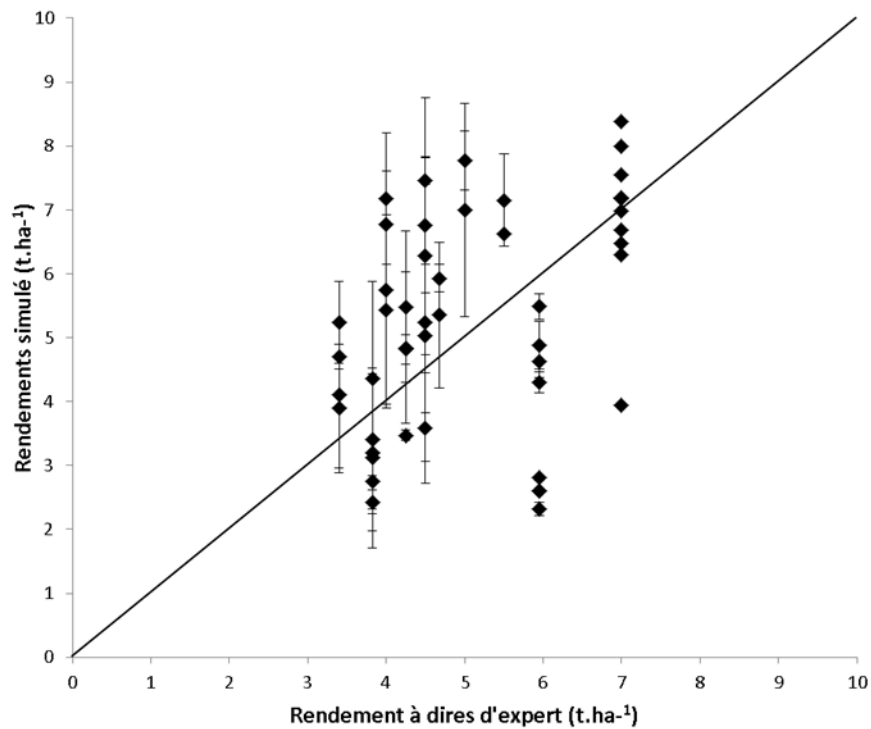


Figure 5.1 : Comparaison des rendements simulés par STICS et des rendements à dire d'expert.

Les écarts types représentés sur le graphique correspondent à la variabilité climatique observées entre 1992 et 2010, plusieurs années climatiques correspondant à un type de climat défini par l'expert (source : Abdelkrim, 2011).

Il est nécessaire d'améliorer les simulations dans les conditions camarguaises. En particulier, il faut activer et paramétrer le module de simulation des remontées capillaires de STICS. Etant donné les résultats, les rendements simulés n'ont pas été utilisés dans cette thèse. Les rendements à dire d'expert ont donc été utilisés pour le calcul des indicateurs.

7. Résultats et discussion des données obtenues pour caractériser les activités

7.1. La base de données obtenue

L'ensemble des données collectées à l'aide des cinq méthodes précédemment présentées a été utilisé pour la description des itinéraires techniques, pour les estimations des coûts des intrants, du coût de carburant, des temps de travaux, des coûts de mécanisation et des indices de fréquence des traitements.

Pour chaque activité, les pratiques agricoles mises en œuvre ont été décrites par un intitulé et par un ensemble de matériel utilisé (voir le tableau 5.3 à titre d'exemple). Ces opérations culturales sont décrites par le temps de travail, la consommation en carburant, et le coût des intrants utilisés. La somme de ces valeurs pour toutes les opérations culturales d'une activité, pondérée par les nombres de passages, donne les temps de travaux et les coûts de chaque activité. Le tableau 5.4 présente, également à titre d'exemple, un extrait de la base de données avec les différents coefficients techniques quantifiés à l'échelle de la parcelle pour les dix cultures considérées dans cette étude (voir chapitre 4).

Tableau 5.3 : Détails de l'itinéraire technique des activités riz conventionnelles.

Dans la première colonne, les chiffres entre parenthèse correspondent aux nombres de passage (qui varient en fonction du précédent et du niveau d'intensité d'usage des intrants).

Opération	Déchaumage	Labour	Reprises du labour (1-2)	Surfaçage	Fertilisations (3)	Rigolage	Semis	Herbicides/insecticides (2-4)	Récolte
Puissance du tracteur (CV)	180	200	180	200	100	100	100	100	180 100 + Moissonneuse
Outil	Cover-crop en V (5m)	Charrue portée 6 socs	Herse rotative (5m)	Lame niveleuse (5m)	Epandeur centrifuge porté	Rigoleuse	Epandeur centrifuge porté	Pulvérisateur porté (18-24m)	Remorques
Intrants	Carburant	Carburant	Carburant	Carburant	Carburant, engrais	Carburant	Carburant, semences	Carburant, pesticides	Carburant
Coûts des intrants (hors carburant)	0	0	0	0	255	0	131	370	0
Temps de travail par passage (h/ha)	0.5	1.3	0.5	1.8	0.3	0.1	0.1	0.3	1
Consommation de carburant (l/ha)	11	31	8.5	44	2.2	1.6	1.75	2.25	32

Tableau 5.4 : Extrait de la base de données.

Les valeurs des différents indicateurs sont présentées pour les dix cultures possibles sur sol argilo limoneux bas (AB), en mode de conduite conventionnel et niveau « intensif » d'usage d'intrants.

Culture	Niveau d'usage d'intrant	Mode de conduite	Précédent cultural	Type de sol	Carburant (l.ha ⁻¹)	Coût du carburant (€·ha ⁻¹)	Coût des fertilisants (€·ha ⁻¹)	Coûts des produits phytosanitaires (€·ha ⁻¹)	Coût des intrants (y compris semences, €·ha ⁻¹)	Coût de mécanisation (€·ha ⁻¹)	Coût de l'eau d'irrigation (€·ha ⁻¹)	Coût de l'assainissement (€·ha ⁻¹)	Temps de travail (l.ha ⁻¹)	Coût de la main d'œuvre (€·ha ⁻¹)	Total des coûts de production (€·ha ⁻¹)	Rendement (t.ha ⁻¹)	Indice de fréquence des traitements
Blé	Intensif	Conventionnel	Blé	AB	108	65	149	152	442	338	0	17	5.5	66	863	4.0	2
Colza	Intensif	Conventionnel	Blé	AB	97	58	171	131	356	352	0	17	5.9	71	796	0.0	4
Lentille	Intensif	Conventionnel	Blé	AB	103	62	0	0	125	301	0	17	4.9	59	502	1.5	0
Luzerne	Intensif	Conventionnel	Blé	AB	139	83	320	0	438	365	76	17	8.9	106	1002	6.0	0
Maïs	Intensif	Conventionnel	Blé	AB	116	70	306	95	641	362	51	17	6.4	77	1147	8.0	2
Prairie	Intensif	Conventionnel	Blé	AB	81	48	0	0	118	76	17	17	5.0	60	288	3.0	0
Riz	Intensif	Conventionnel	Blé	AB	158	95	255	330	716	464	137	17	8.8	105	1439	7.0	3
Soja	Intensif	Conventionnel	Blé	AB	101	60	33	90	285	334	51	17	5.5	66	753	2.5	2
Sorgho	Intensif	Conventionnel	Blé	AB	116	69	64	0	64	394	51	17	6.0	72	598	5.0	0

7.2. Analyse des résultats : comparaison des différents indicateurs

La figure 5.2 présente la variabilité des valeurs de quatre coefficients techniques pour les dix cultures décrites. Les coûts de production, qui sont la somme de l'ensemble des coûts d'intrants (y compris le carburant), de main d'œuvre, de l'eau et de la mécanisation, ont une valeur moyenne de 758 €/ha¹. En agriculture conventionnelle, le riz et le maïs sont les deux cultures qui ont les coûts de production les plus élevés, suivi dans le cas de certaines activités, par le blé et la luzerne (l'année d'implantation). Les cultures les moins chères à produire sont la lentille, la prairie (avec une seule coupe par an) et le sorgho. Cette hiérarchie entre les coûts de production des différentes cultures est pratiquement identique en systèmes biologiques, sauf pour le soja qui est moins cher en biologique.

La consommation moyenne de carburant est de 109 L/ha¹ mais la variabilité est élevée entre les activités. Ce coefficient peut être un indicateur du niveau de mécanisation et en particulier des travaux du sol. Le riz est la culture qui nécessite le plus de carburant. La luzerne consomme également beaucoup de carburant, le principal poste de dépense de carburant étant la récolte (coupe, fenaison, endainage et conditionnement).

Le riz et le colza sont les cultures qui ont les IFT les plus élevés, avec un IFT maximal de 4. Cette valeur est nettement supérieure à la moyenne toutes activités confondues qui est de 0.6. Pour l'essentiel des autres cultures, l'IFT varie entre 0 et 2 suivant les niveaux d'intrants « intensifs » ou « simplifiés ». Toutes les activités en lentille et sorgho ont un IFT nul. Toutes les activités en agriculture biologique ont un IFT nul.

Enfin, le riz, la luzerne et le tournesol sont les cultures qui ont le temps de travail le plus important, avec pour le riz plus de 3h de travail en plus par rapport à la moyenne de 5.8 h/ha¹. La culture prenant le moins de temps de travail est la prairie, qui une fois implantée, n'est coupée qu'une fois au cours du cycle.

Pour certaines cultures, les valeurs de coefficients techniques, diffèrent peu entre activités, traduisant un niveau de connaissance plus faible que pour les cultures telles que le riz et le blé.

Le riz, la luzerne, le sorgho et le maïs sont les cultures qui semblent les plus rentables en mode de production conventionnel (figure 5.3), puisqu'elles ont des valeurs de marge brute de 254 €/ha¹ supérieure à la moyenne dans les conditions de prix de 2009. Néanmoins, pour chaque culture, il existe des activités qui ne sont pas rentables.

En AB, les cultures les plus rentables sont la luzerne, le riz et le maïs. Le blé dur apparaît peu rentable. Les activités en AB semblent, d'une manière générale et dans les conditions de prix de 2009, plus rentables que les activités en agriculture conventionnelle.

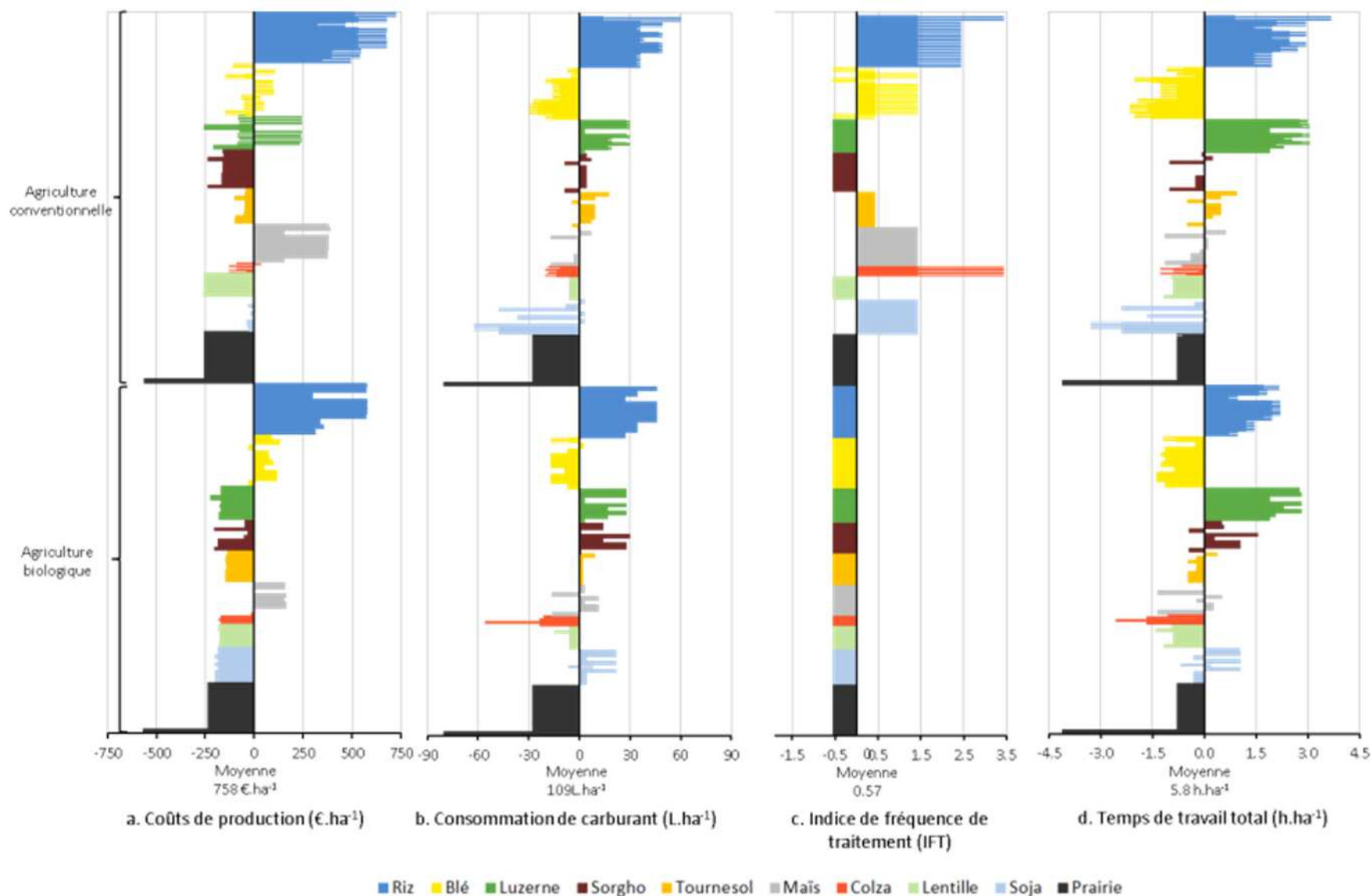


Figure 5.2 : Écart à la moyenne des coefficients techniques par culture et par mode de conduite (biologique ou conventionnel).
Les coûts de production prennent en compte l'ensemble des charges variables et les charges de mécanisation comme seule charge fixe.

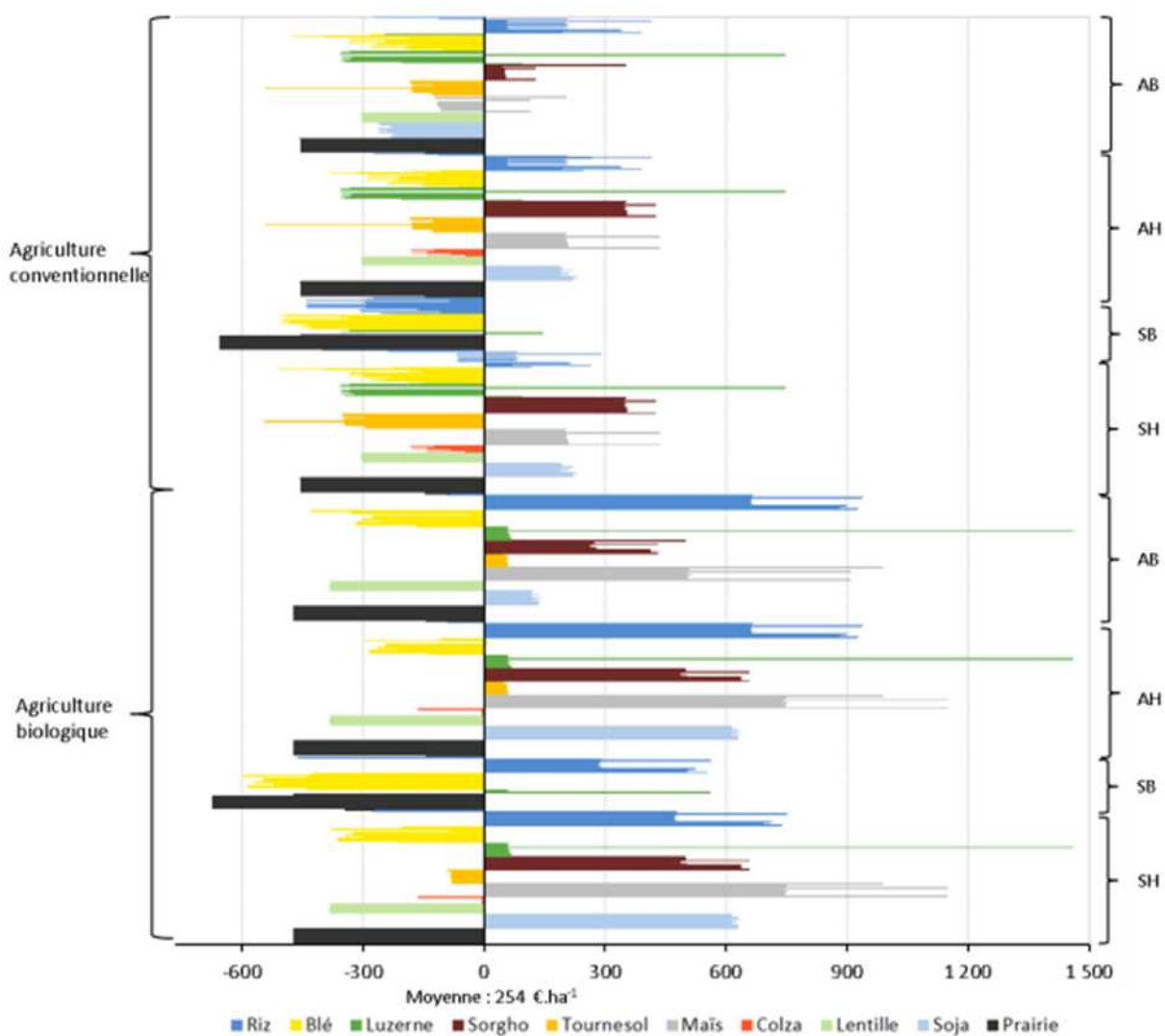


Figure 5.3: Écart à la moyenne de la marge brute par culture, type de sol et mode de conduite (biologique ou conventionnel).

La marge brute a été calculée en multipliant les rendements par les prix de vente de 2009 et en soustrayant l'ensemble des coûts de production.

A partir de la base de données, des fiches ont été construites pour chaque croisement d'une culture, d'un mode de conduite et d'un niveau d'intensification, pour servir de base aux agriculteurs et aux acteurs pour la simulation et l'analyse des scénarios. Ces fiches sont présentées dans l'annexe E.

8. Résultats et discussion des méthodes d'acquisition des données pour caractériser les activités

8.1. Apports et limites de la description quantitative des activités agricoles

Le nombre important de coefficients techniques calculés et les différentes origines des données rendent difficile leur validation. Le tableau 5.5 résume les sources utilisées pour le calcul de chaque coefficient technique présent dans la base de données. Nous avons procédé à une analyse descriptive des données, et la création des fiches a permis de vérifier, en plus des vérifications effectuées par l'expert, que chaque valeur était plausible et cohérente avec les autres.

Tableau 5.5 : Sources des données utilisées pour le calcul des différents coefficients techniques évalués pour chaque activité agricole.

Coefficients techniques	Sources
Coûts des pesticides, des semences et des fertilisants	<ul style="list-style-type: none">• Enquêtes auprès d'agriculteurs et de vendeurs d'intrants• Rapports techniques• Dires d'expert• Base de données du Syndicat des Riziculteurs de France et Filières
Temps de travail et période de travail	<ul style="list-style-type: none">• Description détaillée des itinéraires techniques et des outils utilisés à partir des enquêtes en exploitation.• Dires d'expert
Coûts de mécanisation (et consommation de carburant)	<ul style="list-style-type: none">• Bases de données de l'université de Gembloux et logiciel Compétilis® d'Arvalis-Institut du Végétal
Consommation d'eau	<ul style="list-style-type: none">• Bilan hydrique simplifié et valeur constante (Chauvelon et al., 1998)
Coûts de l'eau	<ul style="list-style-type: none">• Analyse des bilans comptables ou factures des Association Syndicales Autorisées
Subventions	<ul style="list-style-type: none">• Rapport du Syndicat des Riziculteurs de France et Filières• Enquêtes en exploitation agricole
Rendement et variabilité du rendement	<ul style="list-style-type: none">• Analyse de base de données, modèles de culture, dire d'experts.

Lors des séances d'évaluation de scénarios avec les agriculteurs, rapportées dans le chapitre 6, ceux-ci ont passé beaucoup de temps à vérifier ces données. Ils ont parfois souhaité modifier quelques valeurs de rendement qui leur paraissaient trop élevés, mais ont globalement jugé les données « correctes ».

Certains acteurs auraient souhaité disposer des marges nettes des exploitations agricoles. Cependant, le calcul de cet indicateur nécessite des informations sur les charges fixes dans les

exploitations, informations qui n'étaient pas accessibles et que les exploitants refusent la plupart du temps d'évoquer. Le coût des terres, les impôts, les assurances, etc. restent des sujets qui ne sont pas facilement abordables avec les exploitants. Une valeur moyenne ne rendrait pas compte de la variabilité des charges fixes, probablement élevée du fait de la diversité de formes juridiques des exploitations, des systèmes de production et des historiques de ces exploitations.

Peu d'informations ont pu être formalisées sur les impacts environnementaux de l'agriculture. Parmi les informations souvent utilisées dans les études sur les systèmes agricoles, le lessivage des éléments minéraux (voir par exemple Belhouchette et al. (2011)) n'apparaissait pas comme une préoccupation majeure sur la zone au démarrage de notre étude. De récentes discussions avec des acteurs de l'environnement laissent penser que ces informations pourraient les intéresser : ils constatent actuellement des problèmes d'eutrophisation de l'étang du Vaccarès. Ceci nécessiterait l'ajout d'un indicateur à la liste de ceux calculés, mais également une amélioration des connaissances sur ces phénomènes. Elles sont aujourd'hui insuffisantes pour prétendre formaliser ce type de données pour les différents systèmes de production agricoles camarguais.

D'autres données ont été acquises auprès des différents acteurs du territoire, notamment sur les politiques locales telles que les mesures agri-environnementales (Hérault, 2010), sur les formalismes et équation pouvant permettre de simuler les volumes d'eau entrant et sortant du périmètre d'assainissement de Fumemorte (Chauvelon, 1998), sur la politique agricole commune et le fonctionnement des aides (Maldidier, 2010). Ces informations étaient nécessaires à la conception des outils de simulation et au calcul des indicateurs. Elles ne sont pas décrites dans cette thèse, mais sont disponibles auprès des sources citées.

8.2. Retour sur les différentes méthodes employées

L'acquisition des données par enquête s'est révélé un exercice difficile. Les agriculteurs camarguais sont très souvent sollicités pour être enquêté par de multiples groupes d'étudiants et chercheurs de différentes structures. Une enquête avait été réalisée en 2007 par l'INRA (Jaeck *et al.*, 2009). L'UMR Innovation conduisait également une enquête importante en 2010 (Mouret *et al.*, 2011). Nous ne pouvions dans ces conditions multiplier les enquêtes, pour éviter une sur-sollicitation des agriculteurs qui aurait nui à notre démarche participative ultérieure. La limite de nos données issues d'enquêtes réside dans leur petit nombre, et donc dans la nécessité de s'assurer qu'elles sont bien représentatives de la majorité des exploitations.

A cette fin, le travail avec le Syndicat des Riziculteurs de France et Filières sur leur base de données de pratiques de protection phytosanitaire et fertilisation a permis de valider les itinéraires techniques formalisés pour la production rizicole. Un travail avait été entrepris pour croiser ces informations de pratiques (disponibles pour 150 exploitations environ) à la typologie des exploitations. Ceci permettrait de vérifier si les pratiques des exploitants à l'échelle de la parcelle diffèrent en fonction de leur système de production à l'échelle de l'exploitation. Cette analyse n'a pu être réalisée faute de temps et du fait de la sensibilité des informations manipulées (détail de l'emploi de pesticides pour chacune des exploitations rizicoles), qui ont compliqué la négociation pour la mise à disposition des données.

L'analyse de la base de données issue du suivi des parcelles des riziculteurs depuis 1992 a permis de valider la compréhension des facteurs influençant le rendement. Cependant, l'analyse de cette base de données en elle-même ne permettait pas de proposer une valeur de rendement pour chaque activité rizicole définie au chapitre 4. Un travail avec un expert en riziculture a été nécessaire pour obtenir des valeurs crédibles de rendement. De plus, le rendement du riz était certainement le paramètre le plus important de la base de données pour la simulation participative, chaque agriculteur ayant parfaitement en tête les rendements qu'il obtient pour le riz alors qu'il ne connaît pas forcément par cœur le coût des intrants qu'il applique. De même, pour la formalisation des rendements des cultures pour lesquelles nous ne disposons pas de données et pour la vérification d'itinéraires techniques de cultures peu pratiquées, le recours à l'expertise s'est avéré essentiel dans ce travail. Cependant, cette source de données pose la question de la fiabilité de l'expert et de sa capacité à formaliser ses connaissances.

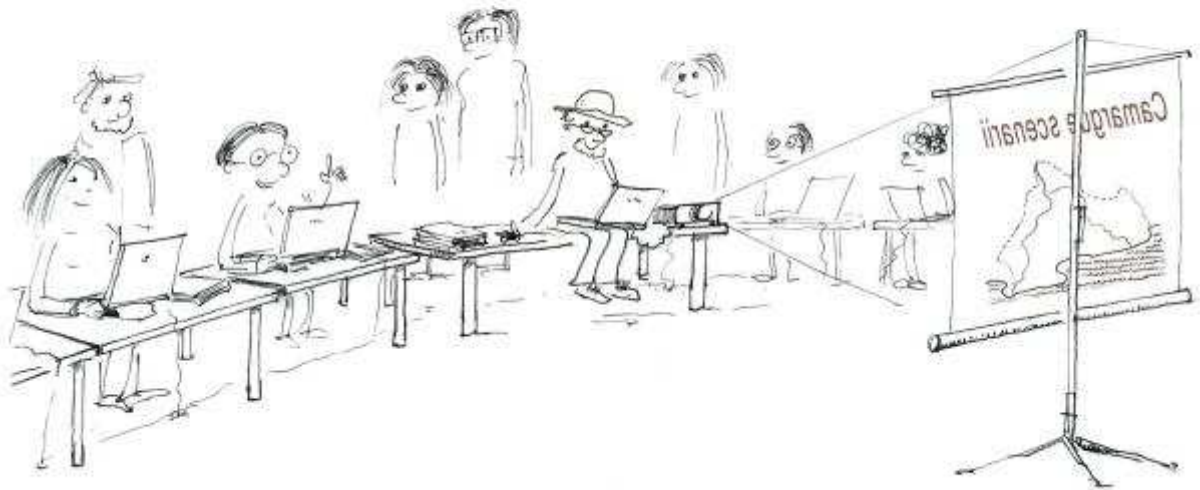
Nous avons cherché à travers le travail sur la modélisation du rendement du blé-dur à valider les dires d'expert via la comparaison des informations issues de cette source et des résultats des simulations (Abdelkrim, 2011). Ces deux approches se sont révélées complémentaires, la comparaison permettant à la fois de remettre en question quelques dires d'expert et d'améliorer les simulations du modèle. L'usage d'un modèle de culture peut, par ailleurs, permettre de simuler des indicateurs qui ne sont pas facilement mesurable in situ, comme la lixiviation de l'azote (Belhouchette *et al.*, 2011). Cependant, bien que ces modèles fassent l'objet de multiples développements, leur mise en œuvre sur de nombreuses activités et leur validation pose encore de nombreuses difficultés. Au total, dans ce projet, plus d'un an-homme, en termes de temps de travail, a été dévolu à la modélisation des rendements du blé-dur alors que les résultats obtenus ne permettent pas encore leur intégration dans la base de données. Un travail a également été conduit sur la modélisation du riz, qui n'a pas abouti non plus du fait de la difficulté d'obtenir des résultats satisfaisants (Vay, 2009; Delmotte *et al.*, 2010b).

Pour conclure, la formalisation de cette base de données n'aurait pas été possible sans l'usage de ces sources multiples de données, bien que cela pose la question de la validation informations ainsi formalisées. Ce travail d'acquisition des données a également fait l'objet de plus d'une vingtaine de réunions en Camargue, ce qui a en retour contribué à entretenir les relations avec les acteurs locaux et à développer une relation de confiance mutuelle.

Synthèse partielle

Dans ce chapitre, nous avons rapporté comment les activités agricoles camarguaises ont été décrites en mobilisant différentes approches. Une base de données a été construite, ainsi que des fiches récapitulatives de ces données, permettant de les discuter avec les agriculteurs et acteurs locaux. Ces données ont été mobilisées par les deux types de modèle développés et rapportés dans les chapitres 6 et 7.

Le temps de la concertation...



Chapitre 6 : Un modèle multi-agent pour l'évaluation participative et intégrée de systèmes agricoles à des échelles multiples : application à la réforme de la PAC en Camargue

Ce chapitre, rédigé sous la forme d'un article scientifique, présente le modèle multi-agent IMPASIAS, développé pour évaluer avec des agriculteurs, des scénarios relatifs à l'évolution des systèmes agricoles. Le modèle ainsi que les principes de son utilisation avec les agriculteurs sont d'abord présentés. Puis, une application réalisée en Camargue portant sur les impacts possibles de la réforme de la Politique Agricole Commune en 2012 et 2014, ainsi que les différents produits de la démarche, sont analysés.

A multi-scale agent-based model for participatory integrated assessment of agricultural systems: application to the CAP reform in Camargue (South of France)²⁷

Delmotte S.¹, Le Page C.², Mailly, F.¹, Goulevant G.¹, Mouret J.C.¹, Lopez-Ridaura S.¹

1 INRA, UMR 0951 Innovation, F-34000 Montpellier France

2 CIRAD, UPR Green, F-34000 Montpellier France

Abstract

Integrated assessment at regional level has recently emerged as a promising approach to study and inform local stakeholders and policy makers about the evolution of agricultural systems. However, results of such approach remain poorly used by local stakeholders, and a way to tackle this issue was found in participatory integrated assessment (PIA). The objective of this paper is to present an approach to study with farmers their possible adaptation strategies to different scenarios in interactive simulation sessions based on an agent based model. This approach was developed in the Camargue, South-East of France, to study the possible impact of the European Union common agricultural policy reform that plans to suppress the coupled payment to rice in 2012 and that is expected to lower the direct payment level in 2014. 14 farmers evaluated different adaptation strategies during three interactive sessions using the IMPASIAS model (standing for Integrated and Multi-scale Participatory Assessment of Scenarios and their Impacts on Agricultural Systems). These strategies were related to the diversification of the systems, and in some case to the partial conversion of the farm to organic farming. The results of indicator calculations at regional level were discussed with five local stakeholders of the region during individual meetings. At regional level, important changes may be expected on land use that would impact and satisfy or not stakeholders' objectives. This approach was found powerful to enhance discussions between farmers, and with local stakeholders about the scenario evaluated and about the future of agricultural systems in the region.

²⁷ Delmotte, S., Le Page, C., Mailly, F., Mouret, J.-C., Lopez Ridaura, S., Submitted-b. A multi-scale agent-based model for participatory integrated assessment of agricultural systems: application to the EU Common Agricultural Policy reform in Camargue (South of France). To be submitted to *Agriculture, Ecosystems & Environment*.

1. Introduction

Agriculture/environment relationships are the subject of a plethora of studies at different levels and across different disciplines. The knowledge about the complex relationships between agricultural systems, farmer' practices at field and farm levels, and environmental impacts is expanding rapidly and it is being incorporated in integrated assessment studies through the use of multiple data sources and modeling tools (Balana *et al.*, 2011).

To deal with agri-environmental issues, the farm level is often considered as unavoidable to get an understanding of the processes that govern farmer choices and to identify windows of opportunities for change (Bamière *et al.*, 2011). However, the regional scale, that we defined as a territorial level that make sense for environmental issues, needs to be tackled through upscaling of farmers practices impacts (Aviron *et al.*, 2007). Multi-scale integrated assessment is therefore needed to evaluate scenarios of agri-environmental systems (Ewert *et al.*, 2011).

In the meantime, the need to involve local stakeholders in policy development and decision making about land use planning is widely recognized to empower local actors for adressing local environmental or socio-economic issues (Patel *et al.*, 2007). The application of the European Water Framework Directive is an example where emphasis has been put on local stakeholders involvement in integrated assessment (Ridder *et al.*, 2005). This epistemological change has led to the formalization of Participative Integrated Assessment (PIA) as a way to improve the quality of decisions when tackling complex problems (Salter *et al.*, 2010). However, PIA has mainly been applied to environmental issues (i.e. the Water Framework Directive (Pahl-Wostl, 2002a, b)) and to global environmental changes (Siebenhüner *et al.*, 2005). We did not found any application of PIA focusing on agricultural systems and territorial sustainability.

For issues closely related to agricultural systems, participative assessment has been mostly applied at field and farm levels (Gouttenoire *et al.*, 2010; Vayssières *et al.*, 2011). At the territory or regional scales, participatory assessment has been more oriented towards natural resource management (Bousquet *et al.*, 2007b; Dung *et al.*, 2009; Simon *et al.*, 2010) and rural development (Enfors *et al.*, 2008; Naivinit *et al.*, 2010) rather than the assessment of specific technical changes in agricultural systems.

We therefore seek to develop and apply a modeling approach for PIA, to tackle evaluate scenarios related to agricultural systems evolution and possible impact on environment issues at farm and regional levels.

Implementing a PIA project requires the use of multiple methodologies for the development of a close relationship with local stakeholders, necessary for the project definition, the methodological developments, the problem analysis and decision making and finally the disengagement. This need is common to all participative research processes, as highlighted by Neef and Neubert (2010). This can be addressed by many different methodologies, companion modeling being a guideline that was developed for such purpose (Etienne, 2010). Patel et al. (2007) proposed a methodology for building scenarios that make use of collective workshops, however these scenarios are being qualitatively assessed. Another issue is therefore the need for tools and approaches for quantitative integrated and multi-scale assessment that can be used in participative manner.

Quantitative assessment of scenarios has been the focus of many projects applying different modeling approaches. In the SENSOR project, Sustainability Impact Assessment Tools (SIAT) were developed based on land use change models and extrapolation of current impacts to evaluate qualitative and quantitative indicators for different European policy scenarios (Helming *et al.*, 2008; Helming *et al.*, 2011). These tools evaluate impacts of land use change through extrapolation functions (so called Land Use Function). However this is not adapted to evaluate alternative systems not yet implemented (see chapter 2 in Delmotte (2011)). The Seamless-IF framework uses bio-economic models to calculate indicators and identify optimal configurations of the system for different objectives (van Ittersum *et al.*, 2008). However these kinds of tools have shown strong limitations for participative assessment (Sterk *et al.*, 2006). The MEA-Scope project uses of an agent-based model which simulates the individual farmer decision making using a bio-economic model based on linear programming, to assess scenario of future European policies (Piorr *et al.*, 2009). But in this case, stakeholders were neither involved in the development of the tools nor in the evaluation of the scenario.

Features of multi-agent system to enhance participation have been widely recognized (Voinov *et al.*, 2010) and agent-based models are increasingly used in integrated assessment studies to cope with the complexity of individuals' decisions and observe impacts at higher scales,

either through aggregation of decisions or emergent properties of population behavior (Moss, 2002; Pahl-Wostl, 2002a; Valbuena *et al.*, 2008).

An agent-based model enables to simulate the individual decision-making processes of different stakeholders represented as computed agents. In agricultural systems, one of the main agents is the farmer and, although many attempts have been done to get an understanding of the decision-making for cropping plan definition (See Dury *et al.* (2011) for a detailed review), its modeling remains a challenging issue.

Interactive modeling can help to overtake this current limitation of farm modeling by asking farmers to tell what they would decide at each step of the simulation. This allows first to access to farmer decision-making and to evaluate, with them, the consequences of their choices (Vayssieres *et al.*, 2009). Observing the farmers in the interactive simulation sessions and discussing their choices can also contribute to formalize their decision-making in different situations and not only in the current one, as proposed by Washington-Ottombre *et al.* (2010).

The objective of this paper is therefore to present a multi-scale and Participative Integrated Assessment approach of scenarios related to agricultural systems evolutions, in a small region. We present the (i) development and application of a model called IMPASIAS (for Integrated and Multi-scale Participatory Assessment of Scenarios and their Impacts on Agricultural Systems) developed with the agent-based simulation platform Cormas (Bousquet *et al.*, 1998), and (ii) its use for interactive simulation with farmers to examine the possible impacts of a scenario of Common Agricultural Policy reform on environment and agricultural systems in the Camargue region, South of France.

2. Material and methods

2.1. The Camargue case study

The Camargue is a deltaic region in the South of France mostly composed of natural protected areas. Only around 70 000 ha out of a total of 167 000 ha are cultivated. It has been labeled as a biosphere reserve (Man And Biosphere Program of UNESCO) since 1977, and it hosts also a Natural Regional Park, a National Reserve and many other associative or private protected areas. Several fauna and flora species are protected and eco-tourism is an important activity. Most land is at sea level and salinisation is a natural process due to the negative water balance between rainfall and evapo-transpiration in this windy Mediterranean climate. The salt pressure is closely related to the altitude, the lowlands being the most exposed to this problem for cropping activities.

2.1.1. Agricultural systems and environmental issues

Agriculture plays a crucial role in the economic, ecologic and social equilibrium of the region. The water dynamics at the regional scale greatly depends on agriculture, as high volumes of fresh water from the Rhone River are used for irrigation of rice fields, this water draining to natural areas and preventing salt pressures to increase. About 20 000 ha are devoted each year to rice production. However, continuous rice production uses large quantities of pesticides, notably herbicides. These pesticides disperse throughout the environment (Comoretto *et al.*, 2008) and therefore, given the high diversity and interest of the local fauna and flora, ecologists have long called for a reduction in the use of pesticides.

Through 10 years of action research in the Camargue delta, a good knowledge of farming systems structures and performances and local stakeholders' networks has been acquired (Mouret *et al.*, 2004). Most of farming systems are based on rice production, cultivated either in monocropping systems or in rotation with durum-wheat, alfalfa and pastures (in case of livestock breeding farms) and occasionally with oil seed rape, sorghum, maize, sunflower, lentil and soya. Economic performances of the current farming system depend greatly on product prices and European subsidies.

2.1.2. Definition of the scenario with local stakeholders

The main aims of involving some farmers and other local stakeholders in the design and use of the model were (i) to gather some data and to elicit their knowledge and perceptions and (ii) to enhance their confidence in the simulation results.

We conducted interviews with the most influential stakeholders of the region (e.g. farmers, grain collectors, the French Union of Rice Producer and Industry (FURPI), the Regional Natural Park of Camargue (RNPC) and the “Syndicat Mixte de la Camargue Gardoise” (SMCG), an institution engaged mainly in natural areas protection) to propose them to work on scenarios of agriculture evolution in the region. During these meetings, scenarios and indicators for their evaluation were derived to guide the data acquisition and model development. According to Lopez-Ridaura (2005b), scenarios can be composed of three kinds of change: (i) introduction of alternative cropping systems (such as low input systems, organic farming and intercropping systems in our case) and adoption of these systems by farmers, (ii) change of objectives of local stakeholder (such as development of organic farming, reduction of pesticides use) and finally (iii) change of context (such as increase or decrease of commodity prices, European Union Common Agricultural Policy (CAP) reform, new agri-environmental measures).

Various scenarios were proposed by the stakeholders, concerning often the relationships between agriculture and natural areas protection. Stakeholders whose activities were more related to production of agricultural commodities felt more concerned with economic changes related to the forthcoming CAP reform that is expected to affect rice production yet in 2012. The current CAP systems support farmers with direct and coupled payments, the reform intending to suppress the coupled payment for some crops (especially rice) (see 2.3.1). Some stakeholders, such as the FURPI, had objectives related to the negotiation of this CAP reform and accepted to participate as they intended to use this analysis for strengthening their propositions.

In collaboration with these stakeholders, data related to the main agricultural activities, to their performance and impacts, were acquired and compiled in a data base and a typology of farming systems in Camargue was proposed (see 2.2.1). In parallel to these data acquisition, the IMPASIAS model was developed and discussed with some of the local stakeholders. It is described in the next section.

2.2. The IMPASIAS model

The model description follows the ODD protocol (Grimm *et al.*, 2006; Grimm *et al.*, 2010), standing for Overview, Design and Details, which is a standard framework widely used to present agent-based and individual-based models. This standard defines the way of presenting a model and the necessary sections to be considered for its descriptions that are therefore used in the next paragraphs.

2.2.1. Model overview

(i) Purpose

The IMPASIAS model is an interactive simulation model programmed with the Comas agent-based platform (Bousquet et al., 1998). It is dedicated to the evaluation of different scenarios of agriculture change with farmers and local stakeholders of the Camargue region, in southern France.

(ii) Entities and state variables

There are three main types of entities in the IMPASIAS model (Figure 1).

- Farmers are characterized by the type of farm they own. The other stakeholders are not represented explicitly in the model, but some indicators defined at different scales from the other entities are directly related to them.
- Each of the ten crops described in paragraph 2.1.1 are characterized by parameters such as the yield, costs of inputs and labor demand (see ‘details’ section). The ‘field’ is also explicitly represented as an entity. It corresponds in fact to a group of fields with homogenous soil type where a single crop can be cultivated at a time. It is described by an area and a soil type and by a management type (organic or conventional) that can be changed during the simulation.
- Four spatial entities are defined in the model: ‘farm’, ‘ASA’, ‘sub-region’ and region (Figure 1). Each farm is described by a type (see the farm typology presented in the next paragraph) and is composed of ten fields. This simplification was done so that each farmer would have the same computer interface. An ‘ASA’ (Standing in French for ‘Association Syndicale Autorisée’) is an association of users that manage a drainage basin, where water from rice irrigation basin is collected to be pumped back to the Rhone River. Each ASA is characterized by a specific distribution (based on areas) of each farm type. The ‘sub-region’ corresponds to a delimited area that makes sense from an institutional and biophysical point of view. Each sub-region is also characterized by a specific distribution of each farm type. The ‘region’ is the whole territory made by the aggregation of the three sub-regions.

(iii) Spatial and temporal scales

The model is a discrete yearly time-step model. The assumptions relative to data used for indicators calculation are compatible with a time horizon of about 10 years.

To capture the diversity of existing farming systems and define the farm agent (Valbuena *et al.*, 2009), and to upscale results from farm level to ASA and sub-regional level, we used a spatial farm typology (Blazy *et al.*, 2009b; Righi *et al.*, 2011) specifically built for this case study (Appendix A). Nine types of rice producing farms were derived and described with the main farming orientation (main crops and style: organic or conventional), farm size, soil types distribution, and the presence of livestock activities. This typology was used to define the nine farmer's agents in the model and to calculate aggregated indicators. Each participating farmer has a type assigned and its choices in the simulation are applied to all farms of the same type at ASA and sub-regional scale. If several participating farmers are of the same type, the total area cultivated by farms of this type at ASA or sub region scale is divided between each participating farmer in the same proportion. Indicators are therefore computed at the four spatial levels: farm indicators are aggregated from field data, ASA and sub-region from farms using the typology, and region from sub-regions (Figure 1). This aggregation is done on the basis of the area of each farm type at the different aggregated levels.

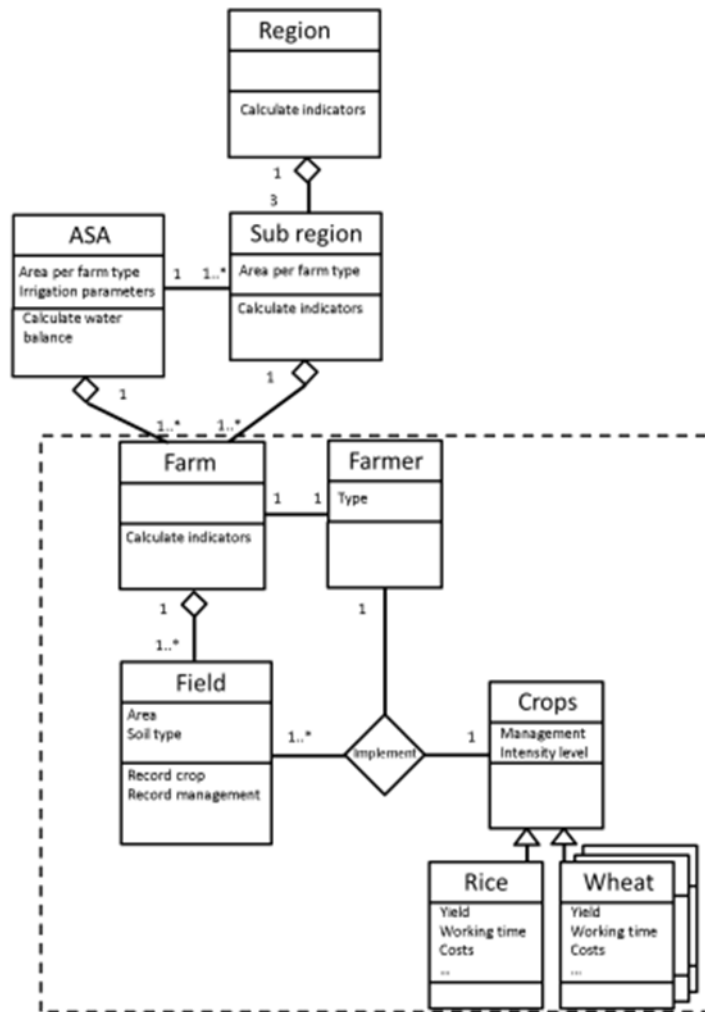


Figure 1: UML Class diagram of the IMPASIAS model.

The classes inside the dotted line box are explicitly represented in the Cormas model, however the parameters and each time step decision during the simulation, as well as the visualization of results are done by farmers using an Excel® graphical user interfaces. Each other classes are using independent Excel graphical user interface to visualize results and parameters are defined in Cormas code.

(iv) Processes overview and scheduling

The basic step of the simulation is made of farmers’ decisions about the land use of their farm. This decision-making process is not encoded in the computer program; it is rather an input provided by real farmers participating to interactive simulation sessions (ISS). During an ISS, each farmer is using a laptop connected via a local network to a central computer that runs the IMPASIAS model on Cormas. At each time step, each farmer sets the crop, the input intensity level (i.e. intensive or simplified) and the orientation (i.e. organic or conventional) of

the 10 fields of his/her farm (Figure 1). This is done with a simple Excel® graphical user interface. An Excel® macro generates a text file that incorporates all the decisions entered by the farmer. It is sent via the local network to the central computer. When the input files from all farmers have been collected by the central computer, the IMPASIAS model is run for one step: it reads the text files to generate the value for the indicators at farm, ASA, sub-region and regional scales.

The results at farm level are then exported as text files in the local network. Each individual farmer opens the corresponding file with Excel on its computer. Thanks to predefined macros in this second Excel file, the values of indicators are automatically and progressively (as time steps are simulated) graphed in Excel.

Farmers can therefore monitor the impacts of the different strategies they tried in the ISS by comparing multiples indicators values for the different time steps. All the indicators defined at the other higher scales are kept on the central computer, to be collectively assessed by all participants at different time of the ISS.

2.2.2. Design

(i) Basic principle

The model was explicitly designed for participatory scenario evaluation and therefore two modules have been externalized from the simulation tool implemented with Cormas to run them with Excel: (i) the user interfaces that farmer can manipulate autonomously, and (ii) outputs visualization of results (maps, graphics at different scales).

(ii) Emergence

The emerging properties of the model are expected to appear by two ways: (i) up-scaling individual farmers behavior to sub-regional and regional scale, showing trade-offs between indicators at the farm and regional scale (ii) from the collective features of the interactive simulation that can stimulate the proposition of alternatives management of the fields and farms and therefore the emergence of consensual alternative configuration of the farming systems compared to the current one.

(iii) Adaptation, objectives, learning and prediction

The objective of the model was to explore scenarios and to learn about the farmer decision making processes and about possible adaptation strategies. Adaptive strategies, objectives and learning of the farmers were therefore observed in details during the interactive simulation

sessions. From an analysis of this information, it might be possible to detect some traits of the decision-making process of each farmer's type that could be used to eventually implement an autonomous version of the current interactive agent-based simulation model.

(iv) Sensing

This part of the ODD protocol refers to “internal and environmental state variables” used by individuals to “consider their decisions”. The indicators calculated at the different scales are summarized in table 1. The data used for calculation of indicators are extracted by the model from a field-scale database described in the input data section. Aggregation at farm scale is done by adding values of each of the ten fields. To upscale to ASA, sub-region and regional scales, the aggregation is done by using a farm typology (detailed in the Collectives part) and the spatial distribution of farm types, allowing to calculate the area cultivated by each activity at each scale and the indicators.

Table 1: Indicators calculated by the IMPASIAS model at different scales and for each time-step of the interactive simulation.

Scales	Indicators
Field / Slot of land	Gross margin (€/ha) Average yield (t/ha)
Farm	Costs of production (€) Gross margin (€) Average gross margin per ha (€/ha) Gross margin including subsidies (€) Average gross margin including subsidies (€/ha) Cost benefit ratio Subsidies over gross margin ratio Total working time per year (h) Working time per 15 days per ha (h/ha) Area organically managed (ha) Average yield per crop (t/ha)
Farm, sub region, region	Amount of subsidies (€) Treatment Frequency Index (TFI) Area of each crop on organic and conventional (ha) Production of each crop on organic and conventional (t) Proportion of area organically managed (%)
Sub region, region	Area of each crop Total value of agricultural productions (€) Proportion of irrigated area (%) Water used for irrigation (m ³) Employment generating by agricultural activities (man year)

(v) Interaction

No interactions are explicitly simulated in the model. However, farmers can interact during the ISS (they are sitting around the same table), especially during the collective discussion by the end of the simulation (see paragraph 2.3.2).

(vi) Stochasticity

The model is purely deterministic in the version used for the simulations presented here. We intended to include the climate as it is main source of stochasticity in crop performance. However, during the first test of the model with students and researchers, it appeared that it was difficult for participants to separate the effects of climatic variability and of cropping choice in the performance of the system. Moreover, generating random climatic years also limited the possibility to re-run the model during an interactive session, in case of user error for example, as it would change the results of the preceding time-steps. For these reasons, no stochasticity effect has been simulated.

2.2.3. Details

(i) Initialization

Each farm is composed of ten fields and the area of each field is 5%, 10%, 15% or 20% of the total farm area, in order to get a realistic number of units on which to take decisions, while keeping the model complexity at a reasonable level.

The spatial farm typology was overlapped with a soil map to calculate the average proportion of each soil type per farm type, and to allocate a soil type to each field. The initial allocation of crops on fields was based on the farm typology (see table 3 in the result section). For example, the specialized rice producer had 80% of its farm area under rice production and 20% under durum wheat. In the first time step of the simulation, a farmer has to decide what crop he grow on each field, also considering the preceding crop. This information is also used for indicators calculations.

Nine farm types should be related to at least one farmer to get a complete representation of the diversity of farming systems involved in the production of rice.

(ii) Input Data

Data describing the agricultural activities were derived from several sources (table 2 presents the definition of an agricultural activity). Management techniques and intensity levels were formalised after 27 farmers' interviews directed to the identification of cropping systems. A database quantitatively describing current and alternative agricultural activities was developed. Ten technical coefficients for the ten most common crops, such as average yield labour demand, fuel, pesticides and fertilizers consumption and labour, were quantified from the farmer interviews, fields surveys (Delmotte *et al.*, 2011), crop modelling (Kichou, 2009; Delmotte *et al.*, 2010b), and completed with expert knowledge and regional statistics (see

appendix A and chapter 5 in Delmotte (2011)). The resulting database is made of 1600 entries, each corresponding to an agricultural activity described by its technical coefficients. The most commonly used data were discussed and validated by farmers and local stakeholders during three preliminary meetings and also during the briefing of the ISS. These data were used at each time step, with the input of farmers in terms of land use, to calculate the indicators (Table 1). Other input data are related to the scenario: e.g. the rice coupled payment level was modified from time step 3 to the end of the simulation.

Table 2: Definition criteria for the cropping activities in Camargue

Determinants/criteria	# of variants	Description of variants
Soil types	4	deep loamy clay, deep sandy soils, shallow loamy clay, alluvial hydromorphic soils
Crops	10	rice, durum wheat, alfalfa, oil seed rape, sunflower, sorghum, maize, lentil, soy bean, pasture
Preceding crops	10	all crops
Management techniques	2	conventional and organic
Intensity levels	2	simplified and intensive

(iii) Submodels

Different rules were incorporated in the model, in relation to the prices of crops when converting the farm to organic farming (OF) and to thresholds of agri-environmental payments and OF subsidies, as these are limited to a maximum value of 10 000€ per farm per year in order to reproduce the current CAP policy for OF. For OF prices, the rule was that if a field is converted to OF, in the first two years all indicators would take the value of the activities in OF, except for gross margin calculated using conventional prices as the crop products can be sold as organic only after this two years period. For OF subsidies, if a field is cropped in organic in the first time step of the simulation, the subsidies considered are the one for maintaining OF with a level of 100 €·ha⁻¹, the total amount of subsidies being limited to 10 000 € per farm. If a field is converted to organic during the simulation, a conversion support of 150 €·ha⁻¹ is given for the five first year, and the subsidies for maintaining OF in the field start in the fourth year after the conversion. Agri-environmental measures were set at 150 €·ha⁻¹ for pastures and alfalfa, also with a threshold of 10 000 € per farm.

(iv) Experiments

The model was used to evaluate a scenario of CAP reform with 14 farmers from Camargue, as reported in details in the next section.

2.3. Use of the IMPASIAS model to evaluate a scenario of CAP reform

In this section, we present the way the IMPASIAS model was used with farmers to evaluate the scenario related to the 2012-2014 CAP reform in the Camargue.

The model and the different interfaces were first tested with two groups of nine students from two French agronomic universities and with a group of researchers involved in the project. This allowed to perform verifications of calculations, and highlighted the need to add some indicators at different scales. For example, an earlier version of the model did not include any indicators about average yield per crop at farm scale, while students and researchers felt the need to have it to evaluate their strategies when playing the role of a farmer.

2.3.1. Scenario definition

The CAP is undergoing a reform that would be set into place in two steps, in 2012 and 2014. Currently it is based on direct payment (independently of the crops grown) of ca. 460€ ha⁻¹ in Camargue and an additional coupled payment to rice of ca. 411€ ha⁻¹ and to durum wheat of ca. 30€ ha⁻¹. The expected change for 2012 is a suppression of the rice coupled payment compensated by an increase of the direct payment using an historical basis that still has to be defined (Maldidier, 2010). This compensation implies that the level of direct payment will differ among farms, for example a specialized rice producer would receive ca. 780€ ha⁻¹, while a diversified crop producer would get ca. 580€ ha⁻¹. For 2014, the expected changes refer to balancing the direct payments levels at European scale, possibly implying a decrease of direct payment for Camargue farmers and homogenous payment among all farms and region (Chatelier *et al.*, 2010; Maldidier, 2010). The current coupled payment was, from the stakeholders point of view, necessary to maintain the current acreage of rice in the region, which supplies local rice processing industries, creates employment and maintain the water quality and balance of the region (Edater, 2008).

The short term scenario of disappearance of this rice coupled payment was therefore found of great interest by all stakeholders and we decided to evaluate this scenario which had several advantages for our methodological developments: (i) it was possible to mobilize farmers for this scenario (for initial collective meetings, for interactive simulation sessions and for

individual feedback interviews) and (ii) local stakeholders agreed to share information and data about local systems as they felt they could learn collectively from such scenario evaluation.

All rice producers of the region (ca. 190) were contacted by an invitation letter sent by the FURPI and the research team. They were proposed to attend a meeting at the rice producer syndicate to discuss about the consequences of the CAP reform and about results of previous work about agriculture in Camargue. 15 farmers responded positively and attended the meeting while 15 more responded they were interested but not available at the proposed meeting date. During a 2-hour meeting, the data and the IMPASIAS model were presented to the farmers and discussions were oriented towards the validity of the data, the values of some specific parameters (prices, current subsidies) as well as about the possible impacts of the CAP reform on individual farmer's farm. At the end of this meeting, 6 farmers agreed to participate to a session of interactive simulation using the IMPASIAS model. They were mostly farmers who produce high quantity of rice on their farm, our interpretation being that they are likely to be the most affected by the expected CAP reform.

The scenario was then fine-tuned with these farmers. The first two time steps of the simulation would be conducted with the current system of CAP premium, i.e. 460€·ha¹ of direct payment and 411€ ha¹ of rice coupled payment. From time-step 3 to the end of the simulation, the rice coupled payment would be removed and direct payment not revalorized to reflect the post 2014 situation. The costs of production of each activity and prices of commodities (from 2009) remained unchanged during the 7 years simulation to facilitate the analysis of the scenario by the farmers. Detailed prices and levels of premiums are given in Delmotte (2011), appendix C.

2.3.2. Scheduling the interactive sessions

A first session of simulation was organized one week after the initial meeting at the rice producer syndicate headquarters (see figure 2), in which six farmers played nine time-steps. A second session was conducted one month later at the same place with five other farmers representing types of farms that were different from the ones corresponding to the first participants. These farmers did not attend the first meeting but had declared they were interested in the project after having received the letter. The schedule of the simulation session was the same, but the meeting started by the presentation of the data and the model, and therefore the limited time allowed to simulate only 7 time steps. A third session was conducted with 3 livestock breeders in one of the farmers' farm, as they preferred to conduct

the session there. The last column in the appendix B reports the number of participant of the three simulation sessions depending on farm types.

The sequence of events of the simulation session was the following:

- The first 30 minutes were dedicated to the discussion of the parameters of the scenario: prices of commodities, subsidies levels in the current situation and after the CAP reform.
- 7 to 9 time-steps of simulation were iteratively sequenced this way: (i) 10 to 15min to select the crops, management and intensity levels for the 10 groups of fields. Farmers were provided with a booklet in which the details of the data (table 2) for each cropping activity were presented (ii) 10 to 15 min to analyze the results at farm scale. The results at regional scales were collectively analyzed twice: after time step 2 (just before introducing the change in CAP), to analyze and validate the current situation in term of regional indicators, and after the last time step, to analyze the change in regional indicators after farmers have adapted their strategies. The facilitator of the session described the main results and showed graphs and maps using a video-projector and farmers discussed the results.
- During the last hour of the meeting, a collective feedback of the session was organized as follow: (i), firstly, each farmer explained to the other ones his/her initial situation, the strategy(ies) he/she adopted, and the results he obtained, (ii) and secondly they discussed what they have learn during the session and what they would have expected to be better represented by the model and data.

During the sessions, members of the research team operated as assistants and at the same time “observers” of farmers, helping them in case of difficulties in interacting with the interfaces and referring to the documentation, as well as recording information like which results did the farmer observed in priority, did they pay attention to graphs...

One week after each meeting, 13 of the 14 participants were individually interviewed to analyze in detail the results of the simulation and, if requested, the results of other participants. The interview was directed to the discussion of the choices made by the farmer during the simulation session, the identification of what the farmer had learnt in the session, if its participation helped him to think of the adaptations he could apply to its own farm, and to identify what would be the differences between the decisions made during the interactive simulation session and its foreseen changes in his/her farm management.

We performed ourselves a run of the model after the sessions with intermediary conditions of the CAP subsidies, by increasing the direct payment on an historical basis for each farm type. For this simulation, the decisions made by the farmers during the ISS were used, assuming that these decisions would not be affected by a different level of direct payment as it is independent of the crop grown. This allowed getting insights about the economic situation farms could face during the transition period of the CAP reform (2012 to 2014) as discussed in section 2.3.1.

The results of the scenario were discussed with five local stakeholders during individual meetings (the FURPI, the cooperative and a private collector, the RNPC and the SMCG). They were asked to express their opinion about the scenario and its results at the various levels, but most of their focus was at regional scale.



Figure 2: Pictures of the first simulation session at the FURPI office and of the third in a farm.

3. Results of the interactive simulations sessions

3.1. Scenario analysis at farm scale

Scenario assessment

The 14 farmers that participated in the simulation sessions adopted different strategies to adapt to the changes of the PAC by changing crops, management and level of input (Table 3). On the one hand, the specialized rice growers and rice growers have notably diversified the panel of crops they were cultivating compared to the reference situation. Durum-wheat was often the first crop they were trying to develop to replace rice that became less profitable. Maize, sorghum and sunflowers are the main crops they introduced. These two types of farms had at the end of the simulation a land use that would classify them as diversified crop producer, meaning that more than 60% of their land was grown with rainfed crops. On the other hand, the diversified crop producer and the livestock breeders (both conventional and organic) did not modify significantly their land use pattern. Two rice growers converted a part of their farm into organic farming (OF) and a livestock breeder carried out the full conversion of the farm that was partially organic. 7 out of the 14 farmers changed their farm orientation, at least partially, to organic farming during the simulation. This second strategy was discussed strongly among the participant and is reported in §3.3. Concerning the input level, some farmers tried to cultivate more land under low input systems to reduce the cost of production, however no clear tendency about the adoption of low input systems could be observed.

Following these evolutions of cropping systems in the context of the CAP reform, the gross margins of the farms decreased from 3 to 47%, depending on farm types and management strategies (table 5). The most affected farms were those five types with important rice surface, while the livestock breeders and diversified crop producers had lower impacts on their gross margin as shown in Figure 3. In the ex-post simulation we conducted with revalorized direct payments, the decrease of gross margin was globally compensated, and the strategies tested by the different farmers (such as crop diversification, decrease input use and conversion to OF) were able to limit the loss, maintain or even increase the gross margin (see figure 3 for an example and table 3).

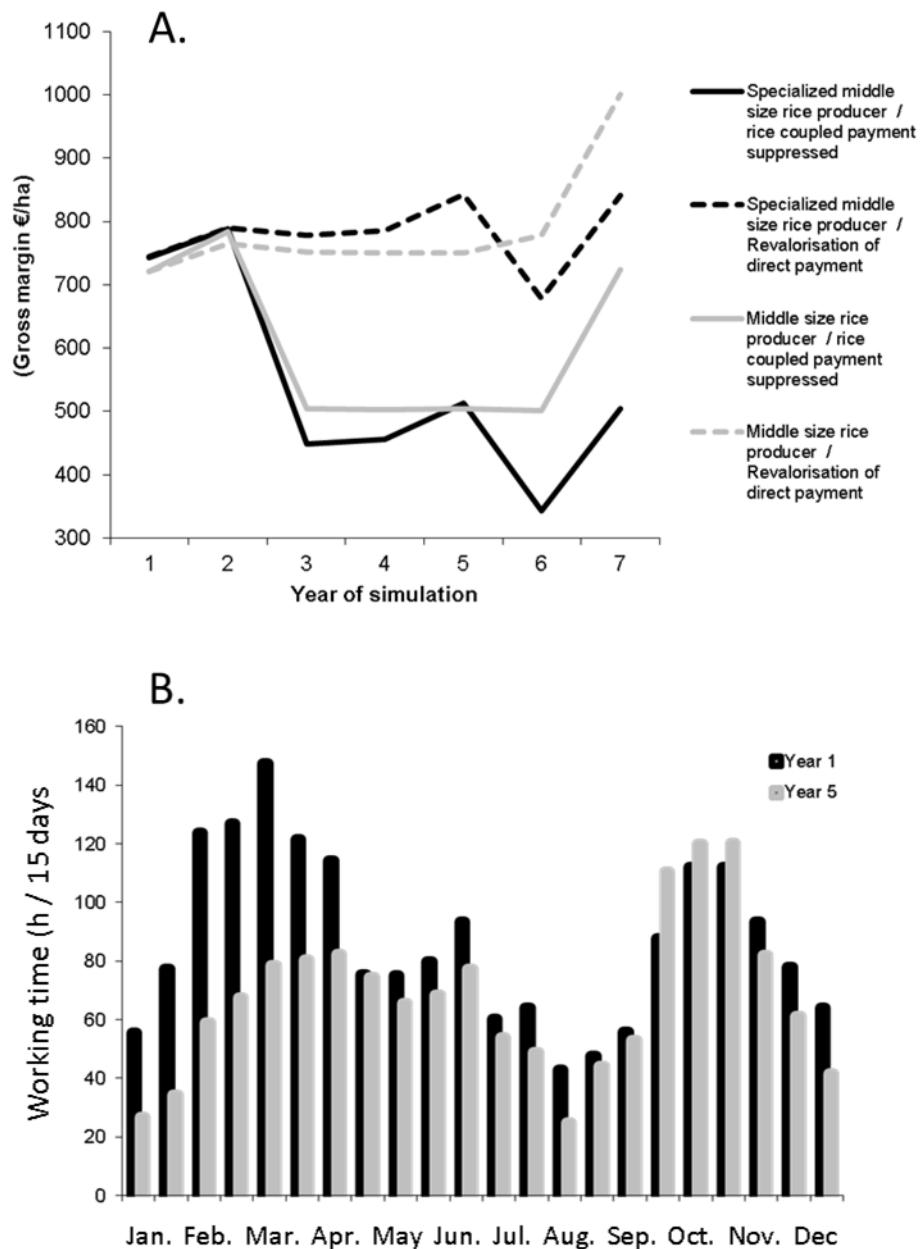


Figure 3: A. Evolution of the gross margin of two farms as affected by the CAP reform and adaptation strategy of the farmer. In continuous line, the coupled payment for rice is suppressed, in dotted line, this suppression is compensated with a revalorization of the direct payment, as expected in 2012. B. Three 15 days- average of the working time (in hour) at farm scale for a middle size specialized rice grower. Year 1 is the current situation and year 5 is after farmer adapted its land use strategy.

These strategies of land use tested by farmers modified the values of different indicators, such as the total working time, the pesticides Treatment Frequency Index (TFI) or the cost benefit ratio (Table 3). For farms where the rice was the main crop grown, the yearly working time has been reduced by the diversification strategy up to 20%. This is linked to the high time needed for rice cultivation, and the relatively lower time needed for wheat or other rainfed crops. These changes of labor time had also repercussions on labor periods (Figure 3 B). The

working peak in spring, due to the preparation of rice fields, decreased while the autumn peak, linked to rice harvest and soil preparation for wheat, increased. Despite a high variability between years, TFI was globally reduced by the different strategies taken by farmers in the CAP reform scenarios (Table 3). Rice having a TFI of 2 to 4, depending on inputs level, was replaced by crops with lower or even zero TFI (such as forages or OF systems). In the extreme case, TFI was reduced by 80%, while for a livestock breeder, an 8% increase was observed.

In a short term scenario where the rice coupled payment subsidy is suppressed and direct payment increased, the impact on the farm gross margin is low. In the foreseen post 2014 situation where direct payment could be homogenized and therefore decreased in Camargue, we observed gross margin loss up to 40% compared to the reference situation. As shown above, at a low level or without coupled payment to rice, there would not be any incitation to grow rice and the diversification strategies that farmers could adopt would have different implications, notably at regional scales (see §3.2). The definition of the scenario was discussed with the farmers with the objective of working in the post-2014 CAP reform. This scenario did not include revalorization of the direct payments as this measure is expected to be only for a transition period of two years.

Farmers reaction to this worse scenario was unanimous, the suppression of the rice coupled payment did not encouraged them to grow as much rice as they were used to do, and they were particularly worried by the impact of such change on their farm.

Table 3: Initial and final area of each crop in the 14 simulated farms, expressed in percent of farm area.

Each line corresponds to one participant. The initial and final percentage of farm area in OF is presented as well. Five indicators of evolution are presented. They were calculated as the difference between the average of the two firsts time steps and the average of time-steps 4 to 7. Time step 3 was excluded as it was the first time-step were farmers started to think of their adaptation strategies. R: Rice, W: Durum-Wheat, A: Alfalfa, M: Maize, So: Sorghum, Su: Sunflower, O: Oil seed rape, P: Pasture.

Farm type	Initial area per crop in % of farm land							Initial area in OF in the farms (%)	Change in area per crop in % of farm land								Final area in OF in the farms (%)	Gross margin (%)	Gross margin with revalorized DP (%)	Working time (%)	TFI (%)	Cost benefit ratio (%)
	R	W	A	M	So	Su	P		R	W	A	M	So	Su	O	P						
Specialized large size rice producer	80	20						0	20	20-60			15-45	5-15				-34	+10	-27	-50	-17
	80	20						0	20	20	50		10				70	-16	+30	-14	-58	-20
Specialized middle size rice producer	80	20						0	30	30	5		10-20	10-20				-40	+3	-20	-40	-12
	80	20						0	40	40	20						15	-38	+10	-21	-43	-7
	80	20						0	10-20	20-60			0-25	0-25				-42	-4	-20	-36	-5
Large size rice producer	60	40						0	40-95	0-50		5-10		0-10				-43	-2	-7	-12	Id.
Middle size rice producer	60	40						0	35-50	10-40	20	10		10				-26	+10	-2	-18	-5
	60	40						0	25-45	25-60			5		15			-42	-7	-10	-8	Id.
Partially organic rice producer	75	25						15	60-75	10-25					5-15		15	-47	-13	-5	-8	Id.
Livestock breeder	45	25	20				10	0	40-55	20-35	20-25					10	45	-22	+1	+1	+8	-2
Organic livestock breeder	25	5					70	80	10-20	5-20	10-25					60	100	-3	+11	-4	-78	-23
	20	45	10				25	100	15-20	35-40	20					25	100	-15	-6	+5	-	-11
	25		35				40	100	20-25		35-40					40	100	-8	-2	-3	-	-30
Diversified crop producer	34	45		15	5	5		0	5-10	50		40-45						-21	+3	-20	-22	+5

Farmers' points of view

The first discussions that were engaged during the simulation sessions were about the **robustness of the data**. Some farmers identified data that they felt were wrong, and depending on the discussions between farmers and scientists, two decisions could be taken: (i) change the figure in agreement with all farmers, or (ii) keep the figure if no consensus could be found among the farmers (it has been the case for certain yields of organic crops) or between scientists and farmers (when the requested change could be expected to bias the results of the simulation and did not correspond to the data and expertise collected). Some changes were made during the simulation, probably in response to the results: e.g. maize yield was more discussed from year 3 onwards as it appeared more importantly in the cropping system. These changes were implemented and the model was re-run from the beginning of the simulation to update the results on farmers' interface. Due to this capacity of changing the data during the session, and after having verified some important data such as rice yield or production costs of the main crops, farmers gained confidence in the data and indicators' calculations, to declare simulation results were 'coherent' and in agreement with what they would have expected. Most of them asked, at the end of the session, to go home with the booklet that contained the data of the cropping activities, and some of them even asked if they could get the software to pursue the exercise at home.

The second type of discussions was about **the impact of the scenario on their virtual farm** and the possible adaptation strategies they could set up to overtake the issue of profitability of their farm in this scenario. Depending on the farm type and, in particular, the area devoted to rice, the farm gross margin was more or less affected. The most affected farmers declared the results 'coherent' because it was showing the dependency of agriculture to subsidies and their importance to maintain the rice activity in the territory. The less affected farmers felt less concerned by this scenario but took advantage of the simulation session to test different land uses with as little rice as possible as it was not profitable anymore.

Concerning the possible adaptation strategies, discussions were about alternative crops to rice and durum wheat, as this crop was not profitable either, with the level of price used in the simulation. Nevertheless farmers considered durum wheat as a good alternative as it was less risky crop than the others. Strong discussions also occurred between 'proponents and opponents' of OF, and about the rotations that could help to control weeds and produce as much rice as possible.

In the individual feedback interview that followed each ISS, farmers went back to re analyze their results and compare what they had done in the simulation with what they would do **in reality in their own farm**. Most farmers declared having appreciated to have tested a strategy in a virtual farm close to their real one (in terms of size, initial cropping systems and distribution of soil types) and that it would serve them in their own strategic thinking about farm management. They also highlighted the positive aspects of organizing these simulations in collective sessions as they appreciated the opportunity to exchange among farmers and with scientists, on graphs showing the impact of the CAP reform. In particular, they appreciated the last part of the simulation session in which they were proposed to expose and compare their systems in term of land use and gross margin. In the case of livestock breeders, although the analysis was incomplete as livestock activities were not included in the model, they appreciated to have the possibility to think about complementarities between crops and forages in rotations on an economic basis.

Farmers regretted **the limits in the predictive value of the approach** but acknowledged its capacity to explore different future situations. In particular, they claimed for other, more complex, scenarios that could include change of prices, new agri-environmental measures, economic incitation to convert to OF and climate change and climate hazards. Despite the importance of product prices for agriculture profitability, none of the farmers or stakeholders was able to define scenarios of price evolution.

3.2. Scenario analysis at regional scale

Scenario assessment

The results presented in this section correspond to aggregation of the 14 farms simulations to the region level, using the farm typology to allocate land use to all farms producing rice in the region as specified in section 2.3.3. The area simulated corresponds to 99% of the area cultivated by rice producer in the region. Among the 35 800 ha cultivated by rice producers in Camargue, about 20 000 are currently devoted to rice production. In the first two years of simulation (corresponding to the current situation), 22 500 ha and 19 900 ha were under rice cultivation, the variation being due to farmers adaptation in the first two years (Figure 4 A). Between 7 200 and 9 600 ha of durum wheat were cultivated by rice producers, not far away from the 10 000 ha reported by the grain buyers. The other crops are cultivated on a small

area in the initial situation: around 100 ha for Sunflower and sorghum and 900 ha for maize. Alfalfa and pastures are cultivated mostly in livestock breeding farms.

The suppression of direct payments triggered changes in the simulated land use at the farm scale which, aggregated at regional level, reduced by half the area devoted to rice (Figure 4A and B). The rice area showed a small increase in the next time-steps to reach 14 000 ha at the end of simulation, representing an overall decrease of 30% compared to the reference situation. Rice was replaced by other crops, such as durum wheat that expanded up to 13 000ha, sunflower (from 700 to 2 400 ha depending on year of simulation), maize (from 1 600 to 2 600 ha), sorghum (from 500 to 1 100 ha) and oil seed rape (canola) (from 600 to 1 000ha) (Figure 4A). The total production of grains to be collected and processed locally (in the case of rice) was reduced by 12% (from 165 000 t to about 145 000 t) (Figure 4C). This is mainly due to difference in average yields of the crops grown: 6t ha⁻¹ for rice and 4.5t ha⁻¹ for durum wheat. The period of grain collection was also affected, rice being collected in September and October, while wheat is collected in June and July.

Organic farming was selected as an alternative system by seven out of the 14 farms in the last time steps. The proportion of organic area increased by 50% and reached 26% of the regional agricultural area (figure 4B). However, most of the organic fields were devoted to pastures and alfalfa, leading to a low volume of organically grown grains to be collected (Figure 4D). This could be due to the fact that organic rice cannot be grown two consecutive years, and that in the model only ten groups of field were considered. Some farmer therefore could not grow organic rice at every time step of the simulation, enhancing this artifact of simulation.

Resulting from the strategies taken by farmers (diversification, input reduction and conversion to OF) the total value of regional production decreased from 45M€ to 36M€, with a slight increase at 39M€ at the end of the simulation. On the other hand the pesticide used, assessed with TFI indicator at regional level decreased by 28% (i.e. from 2.5 to 1.8).

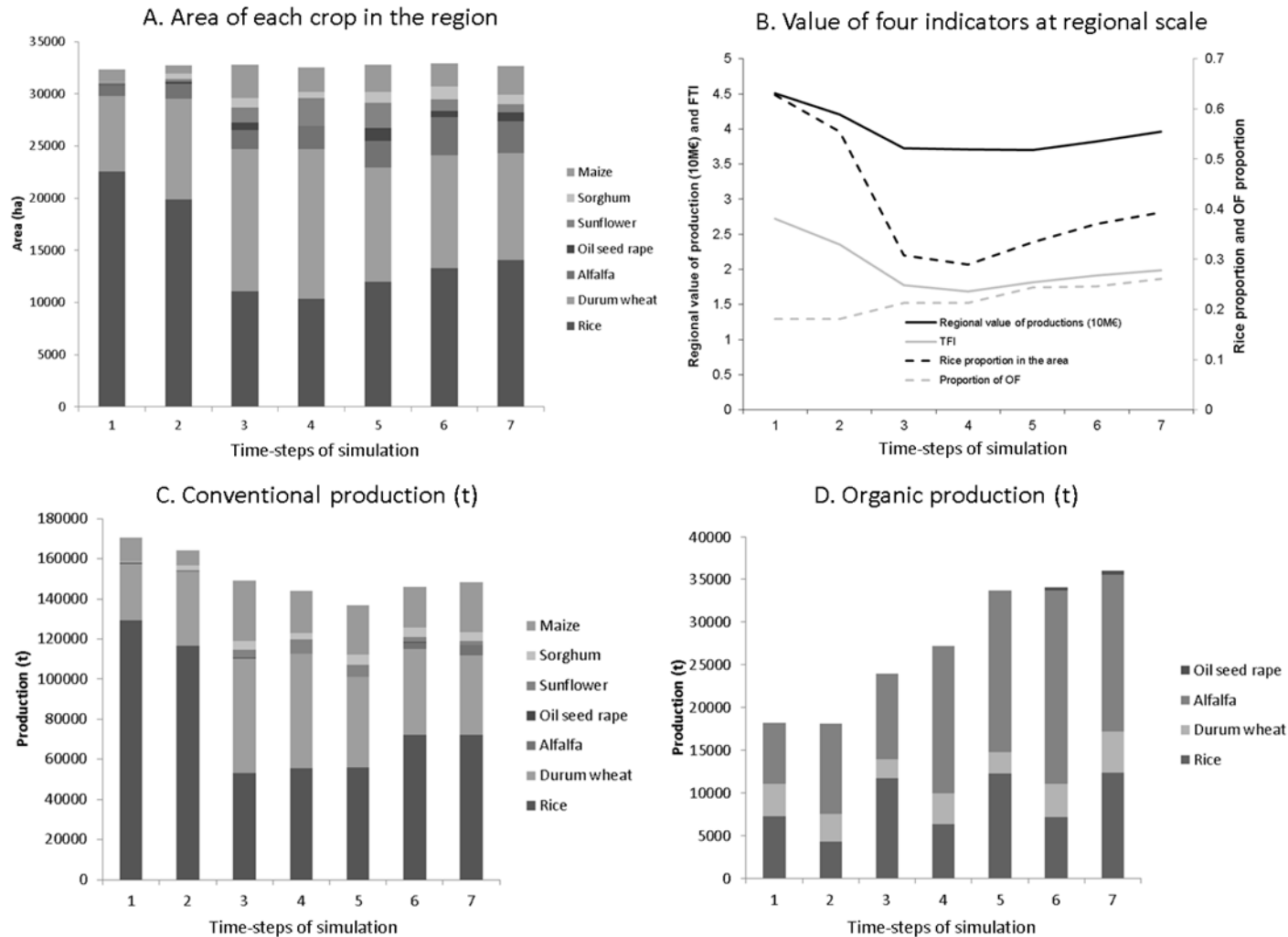


Figure 4: A. Evolution of the area of each crop at regional scale (conventional and organic are confounded here), B Evolution of the regional value of production (10M€), of the Treatment Frequency Index (TFI, no unit), of the proportion of rice in the cultivated area and of organic farming (OF). C. Evolution of the production in tons of the main crops in conventional systems (pastures are excluded as it is entirely self-consumed in farms) and (D) in organic systems.

Stakeholders' point of view

The evaluation of the scenario at regional scale shows significant changes in land use and on the different indicators presented above that could affect different stakeholders in the region, beyond the farmers, such as the input suppliers, the cooperative and the private grain collectors, as well as the water managers. These results were discussed with five of these stakeholders: the FURPI, the RNPC, the SMCG and the two grain buyers.

The first concern of all stakeholders was about the economic impacts of the scenario at the farm and local supply chain scales. Stakeholders from both the agricultural sector and the natural areas management agreed that the situation explored in the scenario would lead to economic threats for the farmers. The FURPI that was negotiating with the French ministry of agriculture the maintenance of a rice coupled payment was interested to use the results of this scenario in this negotiation.

The grain buyers declared that the substitution of rice by other crops would not affect them as silos were adapted to all crops, but the issue would be more the reduction of the global volume and value of production that would imply a decrease of their financial turnover. It would also be an issue if the rice production decreased for the processing companies that need local "cargo" rice (rice that is not decorticated) to produce steamed rice, as only paddy rice (decorticated) is sold in the international market. Concerning the development of OF, both collectors stressed the fact that the current price difference between conventional and organic products (about twice for OF rice) would certainly decrease if the volume of OF products was to increase as in the results of the simulations. However, OF being a niche market, collectors agreed that it is hard to predict its evolution in term of demand/offer balance and therefore price. The same issue was raised with alfalfa hay which is not collected but directly sold or used by farmers.

The second aspect of the discussions with local stakeholders about the scenario results was about the impact of land use changes on the ecosystem. Stakeholders such as the NRPC had few formalized data and knowledge about the details of the cropping systems and were therefore interested by learning the different ways of growing rice, the alternative management techniques or the pesticide application frequency of the other possible crops in Camargue. These stakeholders also showed concerns for the decrease of fresh water entering the delta, as a consequence of rice area reduction. They also highlighted the possible increase of water price as the cost of maintaining channels and pumps would be supported by less hectares of rice.

The other indicators, although having been identified by the stakeholders as relevant in the first interviews, did not received further attention and did not trigger much debate among them.

4. Discussion

Scenario design and assessment

Building scenarios with stakeholders is a subject that has been discussed in the literature and the need to conduct an extensive work with broadest possible range of stakeholders has been highlighted (Kok *et al.*, 2007; Patel *et al.*, 2007). This was the case in our study and the involvement of these stakeholders in the definition of the scenarios ensured their further engagement in the whole simulation and assessment process.

The case study scenario of PAC reform, used to develop our methodological approach, showed the implications of a probable change in coupled subsidies to rice on farmer's strategies in terms of land use, and the impact of these strategies on different indicators at different levels. At farm level, farmers' adaptation led to a reduction of rice area, while diversifying the panel of crop grown on the farm, and in some cases converting part of the farm to OF. These adaptation strategies may not ensure the maintenance of the farm income revenue, in particular in the post 2014 period in which lower direct payment can be expected. At regional scale, the reduction of rice area could impact the quantity and quality of the water entering the Vaccarès Lagoon (Chauvelon *et al.*, 2001), a National Natural Reserve of high interest for biodiversity²⁸. It could also affect the price of irrigation water. The lowest quantity of rice produced could endanger the local rice processing industries. However, the impact of pesticides on natural areas could be lowered by the extension of OF (Lopez Ridaura *et al.*, Submitted). This example is a demonstration of the potential of our approach to assess complex impacts of an alternative form of agriculture (here OF) with different types of trade-off depending on the assessment level (farm or region). Nevertheless, this OF development in Camargue is conditioned by the long term maintenance of the current prices difference between organic and conventional productions. Further economic analysis would be required to hypothesize relationships between amount of OF product and prices that can be used in alternative scenarios.

Other ideas of new scenarios were raised by the NRPC that manage the territorial agri-environmental measures. The decrease of TFI at regional scale did raise the idea to evaluate a

²⁸ See the website of the National Natural Reserve of Camargue: <http://www.reserve-camargue.org/>

scenario with a specific measure in which farmers would receive money in exchange of reduction of treatments.

Data collection and model

Modeling implies the use of multiple data (technical coefficient at field scale, typologies of farm and soil, prices and subsidies) not always easily available (Happe *et al.*, 2011; Therond *et al.*, 2011). The use of these data to calculate indicators raises two questions: the validation of the data and the validation of the results on indicators after calculation and aggregation.

The technical coefficients were subjected to two successive validation procedures: the first was a complete verification with an expert of Mediterranean cropping systems; the second one was the data assessment done by farmers when they were using them for simulations. The high quantity of data and the lack of external sources of data for comparison (the present data results yet from the compilation of many different sources) made it impossible to proceed to formal validation procedures. However, the kind of scenario assessed with the IMPASIAS model does not pretend to be predictive but rather explorative. It gives insight on possible impacts of a given situation, typically answering “what if” questions (van Ittersum *et al.*, 1998). In this kind of studies, the main expected quality of the simulation results is their credibility and relevance to stakeholders to support reflections and discussions.

Concerning the validation of the indicators, and the propagation of errors while up-scaling, this issue was highlighted and shared with stakeholders. The only indicator on which farmers and stakeholders had a reference was the area under rice cultivation at regional scale. In the reference year (time-step 1 and 2), the area was slightly above 20 000ha, i.e. the regional average value of the last 5 year (Delmotte *et al.*, 2011). Stakeholders agreed on this simple validation and decided to focus rather on the variation on the value of the indicators in the scenarios than on their absolute value.

The IMPASIAS model is a simple and flexible tool that allows modifying parameters during the interactive simulation in cases where, for example, participants disagree with the value of a technical coefficient. Although climate variability was first introduced through a stochastic procedure, it was an obstacle for keeping the tool flexible and we found it was not adding much to the discussion. We therefore chose to work with average values in this study. Our current efforts on data are devoted to precise yield and other indicators in terms of their average values and their standard deviation under different climatic conditions to calculate indicators of resilience and stability (Lopez Ridaura *et al.*, 2005).

The environmental indicators calculated in this case study, in particular those related to irrigation water, did not reach a high precision level due to the lack of data and knowledge on the underlying processes at regional scale. However, the flexibility of the IMPASIAS model, developed under an agent-based formalism, allows further developments and our current work is also devoted to integrate within IMPASIAS a more detailed water balance at ASA scale, using data and spatially explicit processes as described in Chauvelon (1998).

Farmers found the model easy to use, the only problem they encountered being with the short time allowed to decide of the land use of their farm. However, the length of the simulation sessions was set by them, requiring that it should not exceed a half day session.

Finally, the model offers limited possibilities to the farmer for adaptation strategies: it is limited to changing land use (crop), management techniques and the intensity level. No possibility was offered for collective actions on land management or for the diversification of farm income sources (e.g. off-farm and non-farming activities such as agro-tourism). However, in the Camargue, no participant foresaw such kind of alternative as farms are yet of high size and farmers working often individually.

Participative simulation and assessment with farmers and stakeholders

Our research objective was initially not directed specifically to the evaluation of scenario of the CAP reform but, more generally, to scenarios of alternative agricultural systems that would reduce the environmental impacts of agriculture. However, the need to work with stakeholders and farmers for data sharing and co-organization of the simulation sessions, as well as to learn from co-evaluation of scenarios, required to adapt the focus of the scenario to their objectives. This was identified, from the beginning of the project, as a potential limit for our study, but after all using the CAP reform as an entry point to discuss with farmers and stakeholders, allowed to include environmental impacts of agriculture, as shown by the results of the scenario and by the discussions with stakeholders reported above. As stated by Neef et al. (2010), the need to be legitimate from the stakeholder's point of view is of primary importance when their engagement is expected. Their involvement might also improve the chance of contributing to local policy making, which is frequently the ultimate objective of integrated assessment at regional scale.

In the first meeting presenting the model and the data applied to virtual farm types, the farmers were skeptic about the input of such approach into their decision making process on their own farm. A farmer explicitly told in the feedback discussion after an ISS that he had

learnt much more than he expected and would like to get a permanent access to the model to pursue the reflection on its farm management strategy. Other farmers also shared this point of view, however one farmer pointed out that the scenario evaluated did not affect much its farm and was therefore not of a great interest for him. As he was a livestock breeder, he would have appreciated more scenarios dedicated to the price of meat for example. This emphasized the need to evaluate, with such model, scenarios where great changes can be expected at farm scale. It highlights the non-suitability of such tools for scenarios that concerns little adjustments of the systems, such as the suppression of a pesticide or the introduction of new varieties that would not affect much the farmers' practices and decision making in term of land use. Local stakeholders found the approach useful and appreciated the fact that farm simulation was conducted by real farmers, which was, in their opinion, a source of confidence on the simulation results.

The observation of the sessions and the individual feedback interviews allowed us to qualitatively analyze the decisions of farmers during the simulations and to explicitly ask them about the differences with the choices they would make in reality on their own farm. Some farmers declared to have the same behavior on their farm and on the simulated farm. Other farmers recognized having taken more risk in the simulation compared to what they would do in reality (e.g. converting 30% of the farm to OF in a single year). In such participative modeling exercise, this behavioral aspect of the participant has to be acknowledged to remind the explorative (and not predictive) nature of the analysis to the stakeholders, who showed a tendency to consider the modeling results as predictions. The observation of farmers during the simulation sessions and the feedback discussion (Washington-Ottombre *et al.*, 2010) might also be a way to gain understanding on the reasoning behind farmers' decision making for land use (Maily *et al.*, Submitted).

Finally, this first scenario analysis related to the PAC reform raised many comments and hypothesis from local stakeholders about the impact of this reform on (i) other non-agricultural activities in the region (such as hunting or reed harvesting) and (ii) the relationship between agriculture and environment. New questions and the need to evaluate more complex scenarios were suggested by local stakeholders including the variation of prices, new local policies such as agro-environmental measures, and new regulations concerning pesticides use (Delmotte *et al.*, Submitted-a).

5. Conclusions

The application of the IMPASIAS model to explore scenarios of the CAP reform in Camargue showed that farmers could set up different strategies to adapt to a reduction or disappearance of the coupled payment to rice. These strategies, when aggregated, would directly impact different objectives of regional stakeholders related to environmental protection, to the viability of the agrifood chains and to water management in the region.

The IMPASIAS model, used with farmers playing the role of farm types, showed great capacities for initiating discussions among farmers about possible adaptation strategies concerning the cropping plans, and their effect on the farm economy and with regional stakeholders about the effects of the scenarios on the economic and environmental issues in the region. This model is flexible for Participatory Integrated Assessment of a wide range of scenarios related to changes in cropping activities, to policy modification, and to local changes of objectives such as developing specific supply chains (e.g. organic) or setting new regulations (e.g. on pesticide use). But it strongly relies on a detailed spatial database on agricultural systems and activities into the region and its sharing with farmers and stakeholders during and after the simulation. The efforts required to build such database should not be underestimated but it is in return one of the major output of such project.

The model development is being pursued by integrating more complex processes concerning spatially explicit water fluxes. It is expected that this agent-based platform will allow to simulate nonlinear phenomena and to show emergent properties that can be used to guide the discussion about water management in relation to rice cultivation in the region.

Acknowledgments

The authors wish to thank the French Environment and energy Management Agency (ADEME) and the internal committee for organic farming (CiAB) of the French National Institute of Agricultural Research (INRA) for financial support, as well as many colleagues and students from SupAgro-Montpellier and ENSAIA-Nancy that participated to the first tests of the model. Finally, we are really grateful to Simone De Hek that supported us in the strategies for planning the ISS with farmers, to Nicolas Castanier that supported us in setting local networks with laptops and to students that helped us in many ways in the ISS organization, and to Jacques Wery for its comment on an earlier version of the manuscript.

Appendix A: Data source used for the quantification of cropping activities in Camargue.

Data	Sources
Pesticide use Seeds Fertilizer use	<ul style="list-style-type: none"> • Interview with farmers and input suppliers. • Technical reports • Interviews with experts • Data Base from the Syndicate of Rice Producers
Machineries and fuel Working time and period	<ul style="list-style-type: none"> • Detailed description of farmers cropping systems and machineries availability via interviews. • Interviews with experts. <ul style="list-style-type: none"> • Databases (Gembloux machinery data base, Central Office of Agricultural Machinery (French ministry of Agriculture, BCMA))
Water use and water drained	<ul style="list-style-type: none"> • Simplified water balance (Chauvelon et al., 1998)
Water cost	<ul style="list-style-type: none"> • Accounting records Water Management Syndicate
Subsidies	<ul style="list-style-type: none"> • Report of the Syndicate of Rice Producers • Interviews with farmers and local stakeholders
Yield and yield variability	<ul style="list-style-type: none"> • Models, statistics and expert knowledge

Appendix B: Data and methodology for the farm typology development

104 farmer interviews (data included land use and agricultural activities, average yield of the main crops, area of land, management type, labour forces availability, machineries, age of the farmer, etc. See Jaeck and Lifran, (2009) for a detailed description of the variable) were first subjected descriptive and principal component analysis. No variable was explaining variability of farm characteristics. The proportion of area under rice cultivation was chosen to represent farmer strategy in term of land use as response variable for classification and regression tree (see Delmotte et al., (2011) for a description of the method). The only variables that came out were correlated variables and none of farm structure was put in evidence by the trees. The typology was therefore done on the basis of this variable, and threshold obtained in the classification tree were used to separate the farms into groups. Variable such as the management techniques and the presence of livestock were also used as they were nominal (to avoid threshold issues) and as they were known to have impact on land use choices. The typology obtained on the basis of the 104 interviewed farmers was then extended to all farms of the regions using a land use map, and individual declarations of all farmers for CAP of 2007 obtained from the “Agence de Service et de Paiement” (national agency for CAP management). The farm typology was spatialized using farm perimeters from CAP data (see chapter 4). The resulting typology is presented in the table B1.

Table B1: Description of farm typology on the basis of soil types, crop, and area covered by each type at regional scale, as well as the level of rice production

Type	Brief description	Soil Type (% of area) ¹				Number of farm of the same type and area concerned at regional scale	Area of rice at regional scale (ha) and percent of rice production represented	Number of representative farmer that participated to the interactive simulation
		DS	DLC	SLC	AH			
Specialized large size rice producer	Farm size > 265 ha. Rice surface > 80%	5	15	60	20	10 / 4205	3365 / 16%	2
Specialized middle size rice producer	Farm size < 265 ha. Rice surface > 80%	5	20	50	25	40 / 5173	4138 / 20%	3
Large size rice producer	More than 60% of their surface under Rice, the rest in durum wheat, more than 276ha	10	15	50	25	8 / 3037	1822 / 9%	1
Middle size rice producer	More than 60% of their surface under Rice, the rest in durum wheat, less than 276ha	5	50	35	10	32 / 4303	2582 / 12%	2
Partially organic rice producer	Same land use as middle size rice producer but an average of 20% of LU in organic	5	30	50	15	14 / 5640	3867 / 18%	1
Livestock breeder	Around 35% of rice, 35% of forages and 30% of other crops	10	10	30	50	13 / 2902	1016 / 5%	1
Organic livestock breeder	Same land use as livestock breeder but with partial or total area in organic	10	25	20	45	19 / 5469	1737 / 9%	3
Diversified crop producer	More than 50% of durum wheat and other crops, an average of 35% of rice	0	45	40	15	42 / 5142	1800 / 9%	1
Organic diversified crop producer	Same land use as diversified crop producer but with partial or total area in organic	0	45	40	15	8 / 1030	361 / 2%	0
		Totals				186 / 36 905ha	20 865ha / 100%	14

¹ DLC: Deep loamy clay, DS: deep sandy soils, SLC: shallow loamy clay, AH: alluvial hydromorphic soils

Appendix C: Prices and level of subsidies for each crop used for the simulation.

Crop	Price (€ t⁻¹)		Subsidies (€ ha⁻¹)				
	Conventional	Organic	Direct payment	Coupled payment	Conversion to OF	Maintaining OF	Agri-environmental measures
Rice	240	500	460	411	150	100	-
Durum wheat	180	240	460	30	150	100	-
Alfalfa	150	150	460	-	100	100	150
Oil seed rape	370	500	460	-	150	100	-
Sunflower	280	500	460	-	150	100	-
Sorghum	150	255	460	-	150	100	-
Maize	160	270	460	-	150	100	-
Soja	300	450	460	-	150	100	-
Lentil	300	500	460	-	150	100	-
Temporary pasture	100	100	460	-	100	100	150

Synthèse partielle

Dans ce chapitre, nous avons présenté le modèle IMPASIAS ainsi que son application pour évaluer un premier scénario avec des agriculteurs. L'intérêt du modèle pour travailler avec des agriculteurs sur des stratégies d'adaptation ainsi que sur des systèmes alternatifs a été mis en évidence. Les résultats du scénario ont permis d'envisager des évolutions de l'agriculture en Camargue, et leurs impacts possibles, avec des acteurs locaux.

Chapitre 7 : Evaluation intégrée de scénarios relatifs aux systèmes agricoles à des échelles multiples : développer un modèle bioéconomique avec les acteurs locaux en Camargue.

La présentation des résultats d'un premier scénario aux acteurs locaux du territoire camarguais, rapportée au chapitre 6, a généré de nouvelles questions de leur part, qui ne pouvaient être facilement analysées avec le modèle IMPASIAS. Ce chapitre, rédigé sous forme d'une publication scientifique, rapporte le développement d'un modèle bioéconomique avec les acteurs locaux pour évaluer de nouveaux scénarios relatifs à leurs questions.

Integrated assessment of scenarios for agricultural systems at different scales: building a Bio Economic Model with stakeholders in Camargue, South of France²⁹.

S. Delmotte¹, F. Cordier¹, C. Toutain², A. Vadon³, B. Vandeputte⁴, R. Vianet³, S. Lopez-Ridaura¹

¹ INRA, UMR 0951 Innovation, F-34000 Montpellier France

² Syndicat Mixte de Gestion de la Camargue Gardoise, 30600 Vauvert France

³ Regional Natural Park of Camargue, 13200 Arles France

⁴ Ex-director of the French Union of Rice Producer and Industry, 13200 Arles France

Abstract

In this paper, we present an approach to build and evaluate scenarios at multiple scales and using multiple indicators with local stakeholders, using a Bio-Economic Model (BEM). This approach is divided in four main phases, consisting in the presentation of the modeling principles and data, the co-building of scenarios and of the BEM, the evaluation of the scenario, and finally the evaluation of the scenarios assessment approach itself. It was developed and implemented with local stakeholders of the Camargue region, South of France. Scenarios assessed include changes related to the European Union (EU) Common Agricultural Policy (CAP) reform and to the national objectives of pesticide use reduction and organic agriculture development. The scenario showed the great dependency of the Camargue farms to the CAP payment and therefore their great sensitivity to the reforms that will suppress the rice coupled payment. This reform could lead to an important decrease in regional rice production and affect importantly the gross margin of specialized rice farmers. With the BEM, different simulations were conducted to identify the level of coupled payment that would encourage farmer to continue rice production at actual levels. With 2009 prices, a threshold of 150 €·ha⁻¹ was identified. However, other prices' scenarios showed the great

²⁹ Delmotte, S., Cordier, F., Toutain, C., Vadon, A., Vandeputte, B., Vianet, R., Lopez-Ridaura, S., Submitted-a. Integrated assessment of scenarios for agricultural systems at different scales: building a Bio Economic Model with stakeholders in Camargue, South of France. To be submitted *Agricultural Systems*.

dependency of this threshold to price conditions. A side effect of the suppression of this coupled payment would be the reduction of pesticide use while diversifying the production. Different scenarios were evaluated with stakeholders involved in the protection of natural areas, to study the room for maneuver in reducing pesticide use and organic farming development. Participatory development of the bio economic model, and evaluating the scenarios with stakeholders, ensured the appropriateness of the model to local stakeholders' issues and a co-learning process between researchers and stakeholders. The approach and resulting BEM might serve as a support for local policy development.

1. Introduction. Scenarios assessment with local stakeholders

Farming systems are complex and dynamic systems that face multiple changes due to a wide range of drivers. Exogenous drivers such as societal expectations from agricultural production and environmental externalities, policy reforms, markets evolution and price volatility, have great impact in the way farming systems evolve. Also endogenous drivers of an agricultural region, such as technological innovations and local policy development, are implemented by local stakeholders to ensure their objectives related to agricultural production. In fact, it can be said that farming systems are in a dynamic equilibrium between such exogenous and endogenous drivers.

For strategic planning, farmers and local stakeholders in a given region are in need of approaches and methods that allow them to foresee possible changes, adapt to new situations and increase their preparedness. Scenario analysis is a common practice to envisage possible futures under changing environments and strengthen the empowerment of local stakeholders by developing new alternatives at field and farm levels, as well as local policies and development programs at higher aggregation level (Patel *et al.*, 2007; Kok *et al.*, 2009).

1.1. Bio-economic models for scenario assessment

In the field of agricultural research, several methodologies have been developed for scenario assessment (van Ittersum *et al.*, 2008; Clavel, 2010; Ronfort *et al.*, 2011; Delmotte *et al.*, Submitted-b; Lopez Ridaura *et al.*, Submitted). Among them, Bio-Economic Models (BEM) have been widely applied in several case studies to explore plausible futures related to agricultural development, and in particular to evaluate *ex-ante* the impact of policy and technological change on agricultural production and the environment (van Ittersum *et al.*, 1998; Janssen *et al.*, 2010).

BEM combine economic and natural resources for the identification of optimal combinations of agricultural activities to achieve a set of objectives related to land use. Agricultural activities are quantitatively described at the field or livestock unit level by their inputs and outputs (called technical coefficients) representing their performance in terms of desired goods and services as well as the environmental externalities attached to them (van Ittersum *et al.*, 1997; Hengsdijk *et al.*, 1998).

Technical coefficients describing current and alternative agricultural activities have been calculated based on a wide variety of data sources such as experimental data (Roetter *et al.*, 2007b), expert knowledge (Kerselaers *et al.*, 2007) and models (crop, livestock, soil dynamics

models) (Roetter et al., 2005; Semaan et al., 2007; van Ittersum et al., 2008). Technical coefficients generators (Hengsdijk et al., 1999) have been developed that summarize the main processes and generate the inputs and outputs used for optimization models.

In explorative studies, BEM are used for the evaluation of the plausible consequences of a combination of external trends and technological changes (including alternative agricultural activities) combined in a scenario (Hengsdijk *et al.*, 1998; Hengsdijk *et al.*, 2003; Belhouchette *et al.*, 2010). Lopez-Ridaura (2005a) identified three main types of scenarios for explorative studies: (i) evaluating the consequences of conflicting objectives by contrasting different objective functions or by maximizing or minimizing one objective while setting another objective as constraint (Lu *et al.*, 2004; Lopez Ridaura, 2005b), (ii) changing the activities considered in the optimization by either adding a new, alternative, activities or changing the values of the technical coefficients (e.g. A new alternatives such as Integrated Soil Fertility Management or Green manures) (Waithaka et al., 2006; Cittadini et al., 2008) and (iii) changing one of the parameters of the model such as the price of a given product, subsidies or taxes (Semaan et al., 2007).

Bio-economic farm models (BEM, Janssen and van Ittersum (2007)) are recognized to be helpful tools to understand orientation of farming systems, at different scales, with respect to long term strategic objectives (van Ittersum et al., 1998). At farm level, BEM have been used in farm economics by defining a utility function where objectives of farmers and their attitude towards risk are taken into account, representing the economic rationale of farmer's decision process. Such utility function is maximized under a set of constraints related to resource availability. Although less common, BEM have been used at regional level in the context of policy formulation and land use planning (van Keulen, 2007). In such BEM, Multiple Goal Linear Programming (MGLP) is often employed when one goal is defined as the objective function to maximize or minimize, the others being described in constraint functions (Janssen *et al.*, 2007).

1.2. Bio-economic models and stakeholders

BEM have been used in approaches for integrated assessment of agricultural systems in many different projects in collaboration with stakeholders (SYSNET (van Ittersum *et al.*, 2004), SEAMLESS (van Ittersum *et al.*, 2008), LUPIS (Reidsma *et al.*, 2011), EULACIAS (Rossing, 2009)). In these projects, different options of agricultural systems are explored and trade-offs between different objectives are identified in order to enhance the dialogue among

stakeholders. Scenarios combining different future conditions and alternative agricultural systems have been assessed and the role of BEM for synthesizing knowledge and proposing policies has been widely recognized (van Ittersum *et al.*, 1998; Zander *et al.*, 1999; Parra-López *et al.*, 2009). BEM are also considered to contribute to collective learning, encouraging partnership, and improved problem specification (McIntosh *et al.*, 2008).

However, the use of BEM with stakeholders has, in most cases, been limited to the actual analysis of scenario results (van Ittersum *et al.*, 2004; Roetter *et al.*, 2007a). Castella *et al.* (2004) however, reported that local stakeholders have found the modeling approach interesting to identify the biophysical limits of agricultural systems but their interest decreased when seemingly unreasonable results appeared (such as converting a whole region into a single crop). Sterk *et al.* (2006) evaluated three experiences where BEM were used at different stages in a project, and concluded that BEM could enhance social learning, only if its use is embedded in a global framework engaging the stakeholders from the beginning.

Another critic to the use of BEM in a participatory manner might be that farmers, or other stakeholders, are represented as rational individuals, whose aim is to optimize one objective having complete information for decision-making (Parker *et al.*, 2003; Parker *et al.*, 2008). Social relationship established between stakeholders, the existence of farmers groups and the multiple influences that affect farmer's decision-making are then not taken into account. As suggested by Sterk (2007), a possible strategy to overcome this issue might be to build a network of "scientists, societal stakeholders and the land use model during model development and application" (Sterk, 2007).

The objective of this paper is to present the process and results of a participatory scenario assessment for agricultural change developed and tested in the Camargue region (South-East of France), using a BEM. This paper is written in collaboration between researchers and local stakeholders in order to highlight the importance of their participation in all phases (including reporting results) of scenario assessment and to guaranty a transparent report of the participatory process.

The following section (2) presents briefly the participatory approach developed for the co-construction of a BEM with local stakeholders. In section 3 the application of the approach to the Camargue region is presented. It starts with a description of the region and of the stakeholders involved in the study, followed by the process of co-construction of scenarios and of the BEM. Section 4 describes the scenario assessment and the stakeholders' point of view related (i) to the scenarios and (ii) to the participatory approach. The results of scenario

assessment and the participatory approach are finally discussed in view of their contribution to the Camargue agriculture and to the needed methodological development to support local stakeholders in managing agriculture in a region.

2. Participatory scenarios assessment at different levels with a BEM: an adaptive process

We developed an approach for the co-development of a regional BEM and the evaluation of scenarios with local stakeholders, in which four phases can be distinguished: (i) the presentation of the modeling principles, (ii) the development of scenarios, (iii) the scenarios assessment and (iv) the evaluation of the overall participatory approach (Figure 1).

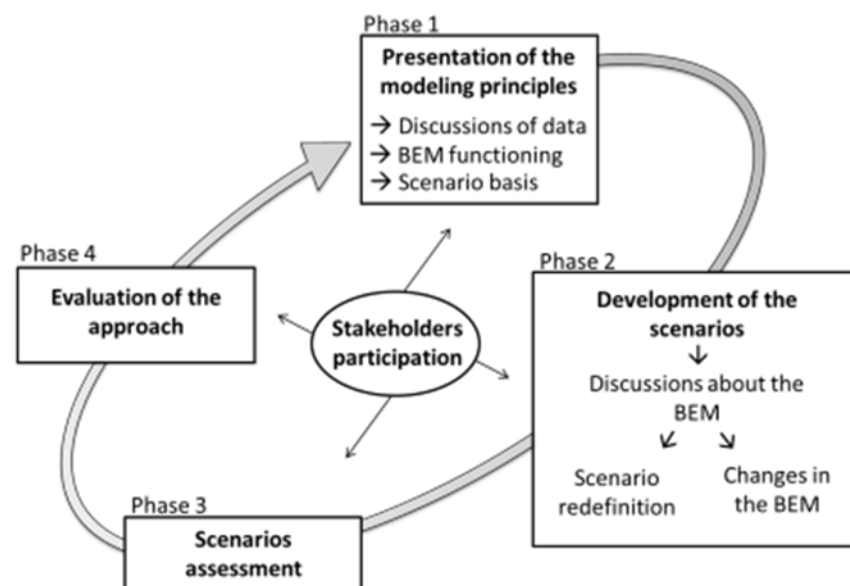


Figure 1: Phases of evaluation of scenarios related to agricultural systems evolution.
This framework is in four phases, all conducted in interaction with stakeholders, related to the BEM development and scenarios definition, and to the evaluation of the scenarios and of the approach

The first phase of the approach is dedicated to an introduction to stakeholders about the principles of BEM and to the type of scenario that can be assessed by such model. This implies that the systems are properly described to share with the stakeholders their limits and processes that can be taken into account in the model. Finally, the data available for the scenarios assessment are discussed.

A second phase of the approach is targeted to the development of the scenario. To ensure a better understanding of the functioning of the model, and of the ways scenarios are assessed (i.e. the classic type of results such as trade-offs curves and spider diagram), a simple model is presented together with a simple assessment of scenarios. Discussion with stakeholders is then devoted to the model development and scenarios definition. This phase may imply several feedbacks from the stakeholders, leading to specific work on model or data, and is essential in the co-building of the model.

Once an agreement has been found on the model setting and on the scenarios to be simulated, phase 3 aims at evaluating the scenarios with the stakeholders. Simulation results are presented and discussed with them.

Finally, phase 4 is devoted to the evaluation of the approach by the local stakeholders. Their opinions on the three first phase of the approach are collected to improve the schedule of a next pathway through the cycle for participatory scenarios assessment.

This approach was formalized and applied in the Camargue region, with local stakeholders, to evaluate two main scenarios related to the evolution of agriculture in this region. In the next parts of the paper, we report on this application.

3. Co building scenarios and a regional BEM with local stakeholders in Camargue

Here we present phases 1 and 2 in the participatory evaluation of scenarios using a regional BEM. We present the region and the stakeholders, then the definition of scenarios related to the Common Agricultural Policy (CAP) reform and to the reduction of pesticide use and organic Farming (OF) development in the region.

3.1. The Camargue region and the stakeholders engaged

La Camargue is a deltaic region of 167,000 ha in south-eastern France (43°40N; 4°37E; 5 meters above sea level). It is composed of three sub-regions separated by the Rhone River that correspond to two institutional regions and three biophysical entities. Around 70,000 ha are used for agricultural production and the rest is protected for nature conservation – an UNESCO Biosphere Reserve since 1977, and public and private natural reserves where species protection and eco-tourism are important activities.

Agriculture has an important function in the economic, ecological and social dynamic of the region. Irrigation of rice fields plays a crucial role in the hydrological dynamics of the delta,

and prevents the accumulation of salt on the soil surface that results from a negative water balance (600 mm deficit between rain and evapo-transpiration (Chauvelon, 1998). According to the French Union of Rice Producer and Industry (FURPI), about 20,000 ha are devoted each year to rice production, the other main crops being grown durum wheat, sunflower, maize and alfalfa. A description of the common cropping and farming systems can be found in Delmotte et al. (2011). Many different stakeholders are engaged in agricultural production and nature conservation. Among them, five were involved in a project of prospective assessment of agricultural systems in the region, that started with stakeholders involvement, data acquisition and scenario evaluation with farmers using another approach with agent-based model (Delmotte *et al.*, Submitted-b). In this project, farmers and other stakeholders were associated since the early beginning for the definition of current and alternative agricultural activities, data acquisition related to their performance in the region, the development and validation of a typology of farms, the identification of their main objectives and the definition of indicators. These stakeholders were therefore informed that the ultimate objective of the project was the assessment of scenarios and that their engagement in the early steps was necessary to ensure their understanding of, and their feedback on, the underlying hypothesis and data used.

These stakeholders are:

- The Regional Natural Park of Camargue (RNPC), which covers about 100 000 ha in the central and eastern part of the Rhone river delta. It was created in 1970 by the local farmers with the objective of conciliating agricultural activities and environment protection, notably by adding value to the quality of agricultural production. As a public institution, it is managed by an advisory board composed of representatives of different public and private local institutions that ensure the implementation of its objectives for the region. With a team composed of more than 30 staff members, it participates to the management of natural wet areas and to the monitoring of the evolution of the different economic activities in the region and the landscape quality. It contributes, through diverse activities of promotion, to the economic development in the region. It has notably participated in the 90's to the setting up of agri-environmental measures related to rice production (for a better management of irrigation water) and livestock breeding activities (for the maintenance of wet pastures and natural grazed area). Over 10% of the region is nowadays contracted under this scheme.

- The Syndicat Mixte of the Camargue in Gard (SMCG) was created by the Gard administrative Department in 1963 to collaborate with municipalities to set up a policy framework for the protection and promotion of wetlands. The SMCG has two main missions: (i) managing the natural areas owned by the Department, some of them being included into the limits of a regional natural reserve (almost 600 ha) and (ii) setting local policies and plans. These policies and action plans are directed towards improving water management and the aquatic environment, the valorization landscape and classified areas through a so called “Grand Site” plan, the education of the broad public with students and visitors (about 13 000 people annually), the protection of the natural patrimonial areas and, finally setting of the objectives of the Natura 2000 plan, concerning 45 000 ha, through participating to LIFE and LEADER EU programs. In this context, the SMCG work together with the farmers and local stakeholders to set up agri-environmental measures to promote farming practices in favor of the natural areas and biodiversity protection.
- The French Union of Rice Production and Industry (FURPI) groups most of the farmers of the region (about 200) and all operators involved in the production, collection, processing, packaging and marketing of rice from Camargue. 20 companies are members of the FURPI among which ten are located in the region, including all storages and rice millers companies. The aim of the union is to defend the interest of rice farmers and rice sector by the research and development of all means likely to improve rice production, processing, packaging and distribution businesses. It acknowledges and support the need of rice cultivation for the maintenance and protection of wet areas, as fresh water that enters these areas is mostly drainage water from rice fields. The FURPI is also the applicant group for the protected geographical indication “Rice of Camargue”.
- Two companies were associated to phase 1 of the approach, and could not pursue in the co-building of the BEM and the analysis of scenarios due to a lack of time available and because they felt represented by the FURPI. The first company is a farmers’ cooperative that collects 50% of rice production from the Camargue as well as an important share of other crops. This cooperative owns shares in a smaller company specialized in the collection and commercialization of exclusively organic agricultural products in the region. The second company is private a company that collect 30% of the rice produced in the region and other crops as well (also into organic production). This company also process local rice and package it. They are thereafter named ‘COOP’.

3.2. Phase 1: Presentation of the BEM principles

The work reported in this paper is limited to the development and application of a regional BEM for scenarios analysis of agriculture evolution in the Camargue with the local stakeholders mentioned above. Stakeholders had at the beginning of this work a global understanding of the project and were confident in its objectives and tools to be used. In this way mutual trust was ensured.

In the first phase (Figure 1), each of the five stakeholders presented above were individually met to (i) discuss the data previously gathered and which intended to be used in the BEM, (ii) present the basis of scenario and identify the main stakeholders views of the future of farming in Camargue and (iii) present the basic structure and functioning of a BEM model.

Data that were collected in earlier step of the project, as mentioned before, were presented using maps, tables and report written about the data analysis. Some of the questions of stakeholders related to these data were about the opinions of the farmers that had used it (Delmotte *et al.*, Submitted-b).

To formalize possible changes and future situations, their views were made explicit at different scales using the following distinction: changes that they expect to happen in the future, changes they would like to happen in line with some of their objectives, and changes that they hoped not to happen as they could be conflicting with their objectives. At field scale, these changes were mainly related to rice alternative sowing techniques (dry sowing to save water), the reduction of authorized herbicides molecules, alternative weed management strategies and organic cropping systems, these objectives being promoted by to the Ecophyto 2018 national plan for reduction of pesticides use. At farm level, changes concerned mainly changes related to new crops developed within the region and their effect on farm land use and performance, evolution of prices of inputs and products as well as changes related to the reform of the European Common Agricultural Policy (CAP). At the regional level, these changes were also related to the CAP reform and its effects on agricultural activities and production as well as to the enforcement of the governmental plans for reducing pesticide use and conversion to organic farming. Each stakeholder had diverging preferences about the scenario to be evaluated. The different scenarios were then developed in parallel with the most concerned stakeholder. The FURPI wanted to study scenarios related to the CAP reform, with questions related to the level of coupled payment to maintain the area under rice cultivation at the regional scale. The grain collectors had the same expectation but added a

component of variability in proposing to evaluate this change with different scenarios of price evolution. The RNPC and the SMCG felt more concerned with objectives of reduction of pesticides use and of development of organic farming, as these are objectives set up by the French government that they have to enforce in the region.

A simple BEM model including only a few examples of agricultural activities, technical coefficient and indicators, and focusing at farm scale, was presented as well as indicator calculation for a simple scenario, to show the type of results and the main assumptions in such type of model.

3.3. Phase 2: Scenarios definition and model development

In a second meeting with three of the five stakeholders (the two collectors had not time to pursue the implementation of the approach and felt represented by the FURPI), the definition of the scenarios to be simulated and the bio-economic model were discussed in detail. For these meetings, a more complex model was developed and used to simulate some simple scenarios related to the change previously identified with the FURPI, RNPC and SMCG.

These scenarios included only one change related to their main objective. For example, with the FURPI, the first scenario only included a change in the CAP subsidy amount, while all other parameters were kept constant to reflect the current situation. A preliminary report was provided to the FURPI, and the critics of the stakeholders to the results led to different changes in the model and in the scenarios:

- In some cases, the demand of stakeholders implied to deeply modify the model: (i) the way the constraints on the preceding crops were implemented was modified to the one presented in the model description section and agronomic constraints were added to get a better representation of land and cropping systems constraints. For example, constraints related to salt concentration in soils and to the need to grow rice to desalinate the soils, were added. (ii) The application of the model for scenarios with the RNPC and the SMCG showed the need to make the model explicitly multi-scale, to incorporate objectives at different scales and identify possible trade-offs between farms to reach an objective at regional scale. (iii) Other modifications were requested by the stakeholders to get a model that represent better the current situation, such as setting thresholds of rice area per farm.
- It raised new questions translated into the model as variations of the scenarios. These variations were implemented by either (i) adding new possible activities for farm

types, (ii) setting limits to indicators values, or (iii) changing parameters values. For example different scenarios of prices for a given scenario of CAP were considered necessary to get a more global view of the impact of the CAP reform.

3.4. Selection of the scenarios

(i) Definition of scenarios related to the CAP reform

The FURPI was engaged in a negotiation with the French Ministry of Agriculture at the mean time of this project. Its claims were about the CAP reform and the maintenance of a rice coupled payment that was given until now to farmers in addition to the direct payment, for each hectare of land cultivated with rice. The CAP reform plans to suppress this coupled payment and to incorporate it, on the basis of the historical amount received by each farmer, into the direct payment for a transition period of 2012-2013, while in 2014 a new CAP would be set up with uniquely a uniformed (between farms) direct payment.

The main challenges for the FURPI related to this reform are therefore:

- To ensure the profitability of rice production in each farm, the CAP subsidies currently playing a great role in offsetting the high cost of production and prices fluctuation, in order to prevent the potential degradations of the means of productions, especially irrigation systems which play a crucial role in ecological and agricultural equilibrium but is supported only by the rice production (i.e. the only irrigated crop in the Camargue).
- To sustain a sufficient volume of rice for the storage and processing facilities located in Camargue to ensure the profitability of investments and ultimately prevent its relocation into other regions or countries.

The different scenarios were therefore related to the impact of the suppression, or of different levels, of the rice coupled payment, and to different levels of direct payment. In addition, the first scenarios presented to the FURPI and the analysis of the results identified the need to take into account the commodity price variability to evaluate these scenarios, as this variability has a strong impact on farmer choice in term of crops to grow. Five different scenarios of prices (Table 1) were defined using the extreme values observed in the last five years, provided by the FURPI and the two grain collectors. The reference scenario, used for the comparison of the results, was based on the 2009 levels of CAP payments. The scenarios were evaluated at farm scale for the main types of farms in term of rice production, and the results were aggregated at regional scale using the farm typology.

Table 1: Parameters used in the five scenarios of price, that were evaluated both for the current situation of CAP payments and for alternatives situations defined with the FURPI. The prices of the other dry crops were indexed on wheat prices, using the 2009 reference.

	Scenarios for Rice (R)and Wheat (W) Prices				
	R W	R+W-	R-W+	R+W+	R-W-
Price of rice (€.t ¹)	250	450	150	450	150
Price of wheat (€.t ¹)	180	140	400	400	140
Rice coupled payment (€.ha ¹)	Current level: 411 €.ha-1 / Hypothesized level: 0-400 €.ha-1				
Direct payment (€.ha ¹)	Current level: 460 €.ha-1 / Hypothesized level: 350€.ha-1				

(ii) Definition of scenarios related to pesticide use reduction and Organic Farming development

The RNPC and SMCG have, among their means for action, the development and enforcement of local agri-environmental measures for Natura 2000 areas. In France, the so-called ‘Grenelle de l’Environnement’ has defined precise objectives in term of agriculture in 2018: reducing pesticides use by half and reaching 20% of the area grown into the organic farming (OF) scheme. These objectives, although set at national level, have to be implemented at local level and the RNPC has included them in its own objectives.

In the Camargue region, irrigation water management for rice systems is also important for the hydrological dynamics in the region and, as a consequence in the maintenance of agricultural fields and wet lands (Chauvelon, 1998). The decrease of pesticides use and the development of OF were identified as candidate objectives to be evaluated in scenario that could sustain the issue of water. Indicators at regional scales were found necessary to get an understanding of the impacts of such change, but the farm scale was also the focus of their interest as these scenarios would certainly have varying impacts on the technical systems and economic performances of the farm depending on the farm type.

Intense discussions occurred at different steps of data acquisition and analysis, in particular on land suitability for crops, agronomic constraints that influence farmers in land use planning

and about the farm typology, which led the RNPC and SMCG to formulate different options (to be evaluated) to decrease the pesticide use and increase OF:

- Changing crop management practices at field scale, by adopting alternative simplified systems instead of intensive ones.
- Changing land use at farm scale, by growing more of the less consuming plants in term of pesticides treatment frequency (TFI).
- Converting partially or totally farms to OF, depending on their current systems, hypothesizing that farms with livestock breeding activities would have more facilities to convert.

These possible changes, related to the level of diversification in farms (possibility in term of crops to be grown) and to the possibility to convert into OF have been set in the model as constraints that were more or less relaxed. The conditions in term of subsidies and prices were discussed, and to take into account the imminent changes of the CAP reform in 2014, these scenarios were assessed with lowered direct payment (350 €·ha⁻¹) and 0 or 250 €·ha⁻¹ of rice coupled payment. The variable used for optimization was the gross margin.

To represent the reduction of pesticide use by half, a constraint on maximum allowed TFI was set at two different levels: farm and region. When the TFI constraint was set up at farm level, the calculation of regional TFI was done by simple aggregation of the farm scale results using the farm typology. When the TFI constraint was set at regional scale, farm types were allowed to decrease the TFI at different rates, as long as the regional TFI was reduced by half (allowing compensations among farms).

For OF systems, the current difference of price between conventional and organic production (about 1.5 according to our data) renders this alternative system greatly attractive, so that if it is possible for a farm type to adopt it, it will completely convert in the model. Discussions with the collectors led to evaluate different scenarios related to price difference, as the current difference of price can only be maintained due to difference between demand and offer. In their opinion, if a fast or important development happens, they won't be able to maintain this difference. Different scenarios of price difference (between 1.5 and 1) were therefore evaluated to identify possible thresholds in OF economic attractiveness.

4. Scenarios assessment with local stakeholders

The final version of the BEM that was used to explore the scenarios defined by stakeholders is presented in Appendix A. The results of these scenarios were presented to stakeholders

using different types of graphic representations (histograms, trade-offs curves, and spider diagrams) and discussed with stakeholders. Also, stakeholders were asked to criticize the results and the model, expose their view about the scenarios and synthesize what they have learnt.

Results presented here are divided in two sections, first some results of the scenarios are exposed and analyzed, and secondly the stakeholders' points of views about these scenarios are exposed. We present the analysis of these scenarios at two different scales: farm and region. One other scale was explicitly simulated on the demand of the stakeholders, the sub-regional scale (the Camargue Gardoise, Grande Camargue and Plan du Bourg (table 4), as the SMCG is in charge of the first sub-region, the RNPC being in charge of the two others), however they did not expressed any specific reactions on results at that scales, which are not presented here.

4.1. Scenarios assessment by local stakeholders

4.1.1. CAP reform

At farm scale, the first simulations discussed with stakeholder did not allow the diversification of activities and farm had to limit the number and types of crops to be sown at those already practiced. At farm scale, with the 2009 prices (scenario RW), the result showed only little changes on land use and in particular on the rice area in the farms, in comparison with the current situation. Farms gross margin was however affected as follow:

- The reduction of gross margin was between 17% and 45%, depending on farm type.
- The more affected farm type was the specialized rice producer, where the reduction of gross margin compared to the reference situation (coupled payment of 411 €·ha⁻¹ and direct payment of 460 €·ha⁻¹) was 28% and 45% respectively for two scenarios with a coupled payment 250 €·ha⁻¹ or of 0 €·ha⁻¹ and a direct payment of 350 €·ha⁻¹.
- On the contrary, the least affected farm type was the livestock breeder where the reduction was between 17% and 26% for the same scenarios.

When possibility for diversification was partially offered to the farm types (for example, specialized rice grower that currently grow only wheat and rice, can grow sorghum and maize in the scenario), the results differed slightly from the preceding ones as reported in figure 2. This situation corresponds to a post 2014 CAP reform with lowered direct payment and different levels of rice coupled payment, while the prices were kept at the same level as in RW scenario. Figure 2-A presents the results for a livestock breeder for different scenarios

related to rice coupled payment. It shows that the level of coupled payment would have a low influence on land use decision and therefore on most indicators. The gross margin is the only indicator that would decrease proportionally with the decrease of the level of rice coupled payment. On the other hand, for a farm type specialized in rice production, the level of payment would have an important impact on land use (figure 2 B): without any coupled payment, the area cultivated in rice would decrease by 30% of the farm area (from 78% to 48%), while, with 250 €·ha⁻¹, it would be maintained. All indicators would be sensible to such change: the value of production, the cost of production, the gross margin, the labor time and the TFI would be substantially decreased.

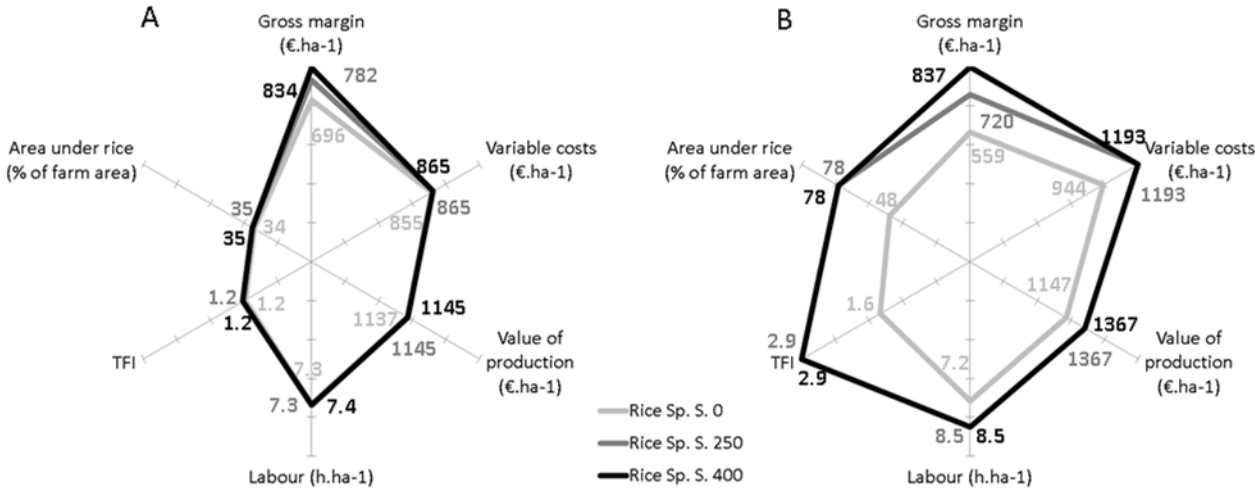


Figure 2: Spider diagrams made with six indicators normalized for three different scenarios of rice coupled payment (Rice CP) level. 0, 250 and 450 €·ha⁻¹ for (A) a livestock breeder farm type and (B) a specialized rice producer farm type.

To better capture the impact of such CAP reform on land use in the region, different indicators at farm and regional scales were also calculated for five different scenarios of price (Table 1).

The results of these five scenarios were aggregated at regional scales using the farm typology. With the prices of the first scenario, as reported in figure 2-B, to maintain a high proportion of rice in the specialized farms, there is a need for a coupled payment. The effect of this eventual subsidy at regional scale can be seen in figure 3 - scenario RW. Between 100 and 150 €·ha⁻¹ of

coupled payment, there is an effect on the regional rice area: above 150 €·ha⁻¹, more than 55% (18 000 ha) of the region would be cultivated under rice (what is approximately the current level), while with less than 100 €·ha⁻¹, only 40% (12 800 ha) of the region would be cultivated on rice. On the one hand, scenarios R+W- and R+W+ are cases where rice is so profitable that there is no need for coupled payment to make rice attractive for farmers. On the other hand, scenarios R-W+ and R-W- (figure 3) are two cases with different values of rice and wheat prices where rice would be less attractive than durum wheat and other dry crops. In scenario R-W-, a high coupled payment would add to the economic attractiveness of rice, while in scenario 3, the rice is so economically unattractive that even a high coupled payment (i.e. 400 €·ha⁻¹) has no impact. In this situation, the 22% (6900 ha) of rice in the region correspond to the minimum area defined by the agronomic constraints, which would be needed to desalinate the soils and keep a viable crops production (Mailly *et al.*, Submitted).

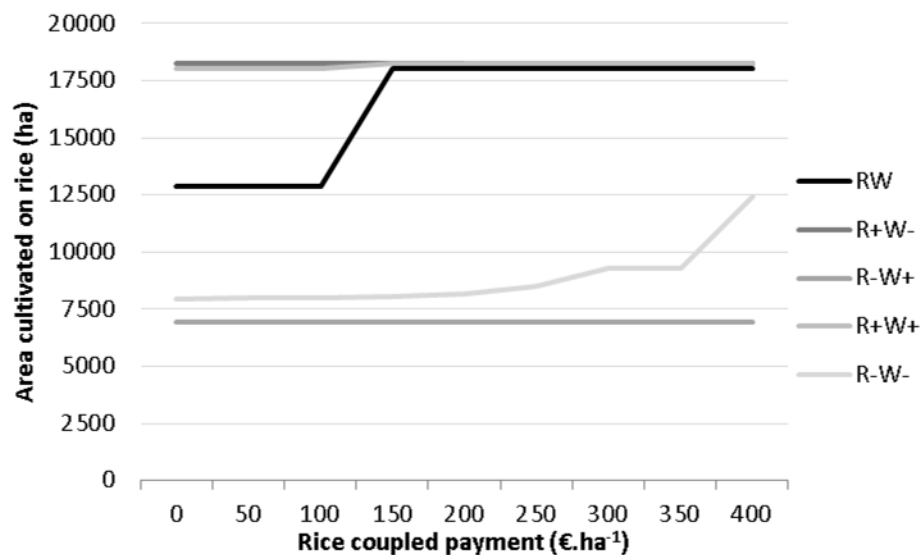


Figure 3: Evolution of the proportion of cultivated lands used for rice cultivation at regional scale, for the five scenarios of prices and an amount of coupled payment between 0 and 450 €·ha⁻¹.

4.1.2. Pesticide reduction and Organic Farming development

In this part, we present some of the results related to a scenario, allowing farms to convert 20% of their lands to OF and with different objectives of reduction of the pesticide use index (TFI). In this scenario, farms were allowed, depending on their type, to grow alternative crops compared to the one they currently have.

In all farm type, when 20% of land area in OF was allowed, it was immediately adopted, even if no constraints were set up on TFI or on a minimum of area in OF at farm scale, due to the relative economic attractiveness of organic systems compared to the conventional ones.

Reducing the TFI while keeping conventional systems had impacts at farm scale in terms of land use and economic indicators. In the case of a livestock breeding farm for example, the impact on the rice area was low, the reduction of the TFI by two being mainly obtained by replacing intensive rice cropping system by simplified system (Figure 4). Gross margin was only affected when the objective of TFI was below 0.7, which implied a decrease in the rice area. The impact on the specialized rice grower were greater, as it had to reduce more its TFI in term of absolute value and as it implied massive changes in land use: a reduction of the area under rice cultivation of nearly 50% (from 80% to 42%), and an increase in simplified rice cropping systems. In this case too, with diversification of productions, the average gross margin only suffered from a limited decrease (about 40 €/ha¹). However, in scenarios were farms would keep the same crops and only change the proportion of each crop (for example for a specialized rice producer, only rice and durum-wheat) or the intensity of input used (intensive to simplified), the gross margin would be strongly affected.

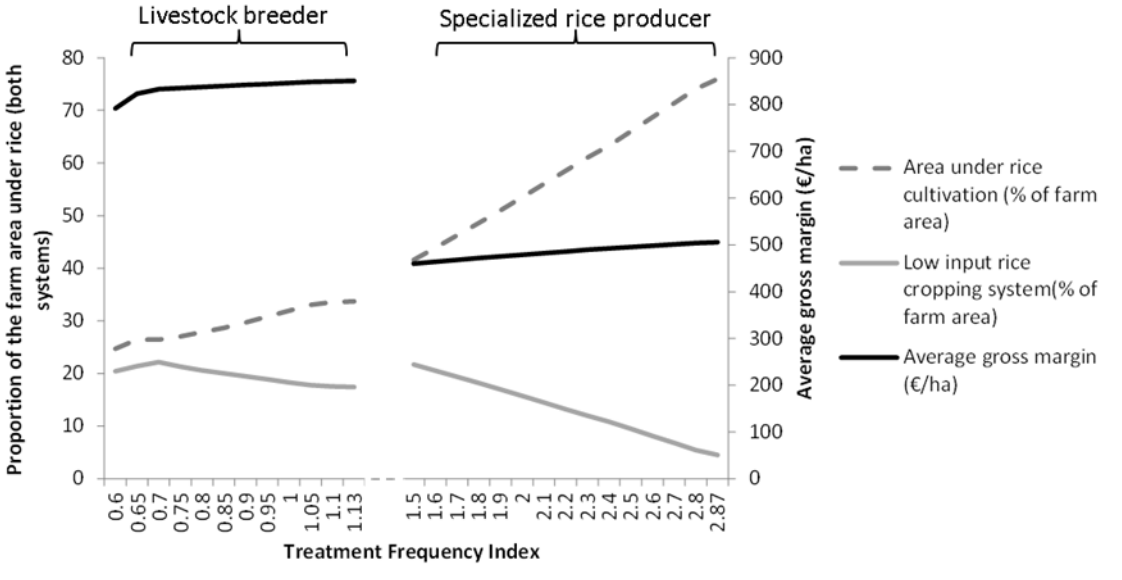


Figure 4: Trade-off curves between the proportion of rice in the farm area, the average gross margin and the treatment frequency index (TFI) for a livestock breeding farm (on the left) and a specialized rice producer (on the right).

For both, the trade-offs start at the current situation and are reduced by almost half.

Concerning OF scenarios, with a price ratio of 1.5 between organic and conventional products, if there is no limit to the conversion, farms would convert between 27 and 90 % of

their land. This difference is mainly explained by the proportion of each soil types and by the crops currently grown in the farms.

Reducing the TFI from the current value of 2.1 to 1.2 at regional scale would have impacts on the agricultural sector in the region (Figure 5 A): the regional value of production would be decreased by almost 15% while the rice area would be decreased by 37%. These changes in cropping systems would also imply a reduction of employments generated by the farming activities as the total labor time would be decreased by 14%. It would also have positive impacts for the environment, as in parallel to the pesticides reductions the fuel used for all mechanical activities would be reduced at regional scale by 11%. The amount of subsidies at regional scale would not change much in this scenario, where no coupled payment for rice has been taken into account.

Setting the constraints of reduction of the TFI at farm or regional scales gave different results. Reducing TFI with an objective set at regional scale had a greatest influence on farm that grew rice in a high proportion, due to the TFI of this crop. The TFI reduction for this type of farm was more pronounced because it was less costly for the region to reduce primarily in this type of farm than in farm that had yet low TFI. However, when the regional TFI was 1.9, reducing it to 1.8 implied to modify also the TFI of livestock breeding farm (Figure 5 B). This compensatory effect between farm types reflected the inequality of cost of reducing the TFI between farm types while reducing the regional TFI.

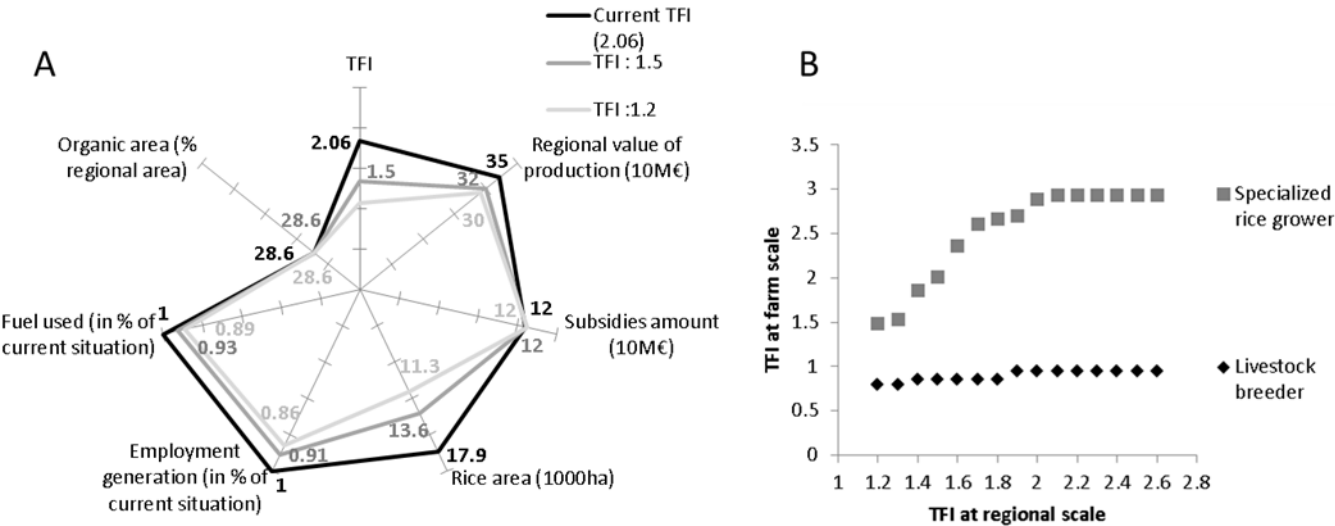


Figure 5: (A) Spider diagram of three scenarios at regional scale of TFI: the current TFI level, a regional TFI of 1.5 and a TFI of 1.2. (B) Trade off curves between the TFI of two farm types and the regional TFI.

The regional development of OF simulated without any constraints on a maximum area for conversion would lead to 59% of lands on OF with the 2009 prices and a 1.5 ratio between organic and conventional prices. However, when this difference of prices was varied between 1 and 1.8, two different behaviors could be observed: in farm where forages could be grown (livestock breeding farm), it was almost always more profitable to be in organic as these systems are not so different in term of land use. In systems without any forages and varying objectives of rice production, for example in diversified crop producer farms, there was a transition from 0% of land in OF to 90% when the difference of price went from 1.25 to 1.5. Conversion to OF is therefore quite sensitive to such price difference, and this sensitivity depends on the type of farm and its resources in terms of area per soil type.

4.2. Stakeholders points of view related to each scenario

4.2.1. Scenario of CAP reform

The final simulations were done after multiple discussions with the FURPI about the model development and scenario definition (reported in 3.3.1). Concerning the scenario results, the over-estimation of the rice area in specialized rice farms was a key point: in the reference situation, expected to be close to the current situation, an earlier version of the model simulated an optimum of rice area at 100% of the farm. Discussions were engaged on the constraints that influence this type of specialized rice farmers' decisions of growing less than 100% of their farm in rice. They pointed out that the model did not take into account the need to grow at least two crops at the farm level to be eligible to CAP subsidies. Also, cultivating the whole farm on rice is unpractical as labor demand and machinery would be concentrated in a short period (i.e. spring and autumn). A constraint was introduced in a further version of the model to limit the area under rice at farm scale, which helped to get better results in the simulation of the rice area (Table A4).

At regional scale, the results of the aggregation of the effects of the scenarios on rice area and on the quantity of rice produced were found of great interest by the FURPI. The FURPI is the representative of farmers as well as industries and the whole supply-chain of rice production in the region. For this reason, its interest is to maintain a high acreage of rice production in the region to supply the whole local supply chain. With the constraints added and current subsidies levels, the rice area in the RW scenario is about 19 000 ha, which was close to the 2010 or 2011 situations. In scenario 3 for example, the rice area could decrease down to 6 000 ha, what was seen as the worst scenario for the FURPI, with many non-wished consequences which would threaten the sustainability of farming in the region. However, the fact that in the

RW scenario the area under rice cultivation would decrease to less than 13 000 ha at regional level confirmed there view that the 2012 and 2014 CAP reform could lead to a decrease of rice production in the region. They also acknowledged the dependency of such results to exogenous parameters of the system, such as the prices.

In operative terms, and because of the conjectural situation of CAP renegotiation, the question to which the FURPI expected answers was about the threshold level of a coupled payment for rice to increase its attractiveness compared to the other crops. Although such threshold was found (at a level of ca. 150 €·ha¹), a fine analysis of the model showed the high sensitivity of this threshold to prices and uncertainty in input data. Even if this improved their understanding of the multiple drivers influencing farmers to grow rice, it nevertheless enhanced a feeling of un-confidence in the model and made the interpretation of the simulations results more difficult. In fact the FURPI was not able to use these results as they expected to do it, due to this high variability and due to the overestimation of rice area in the simulation at farm scale. However, their negotiation process with the ministry of agriculture may have been influenced by the understanding of the complexity of these drivers and of the sensitivity of this farming activity to external conditions.

Comments arose also about the short and long term potential impact of this reform: in the short term (2012, the year after the realization of this study), the coupled payment would be incorporated on an historical basis in the direct payment, while in the long term (2014) the direct payment would be reduced. The analysis of the scenario was therefore declined in two steps, one for each time horizon. With such change on subsidies levels, the area under rice cultivation was not anymore the most relevant indicator (as it is not changing with direct payment level), the impact of the reform on the gross margin including subsidies of farms appearing more interesting for the FURPI.

4.2.2. Scenario of pesticide reduction and OF development

The different stakeholders had diverging opinion about the relevance of evaluating scenarios related to environmental issues such as pesticide use reduction or OF development. While the NRPC and the SMCG found it of great interest, the FURPI mentioned that behind the reduction in the use of pesticides there are multiple stakes related to the regulation and reduction of available products, the development of resistances and the need to keep developing new products and to reduce the discrepancy in pesticides regulations among EU countries. This subject was found therefore quite complex to study and the FURPI that was

critics about these scenarios had the fear the approach undertaken would be too reductionist and would provide clear-cut solutions too simple to be implemented. The NRPC and SMCG were however interested to use the model to explore the possible costs, in terms of economic profitability of farms, of reducing pesticide use and about the impact of OF development at regional and farm level.

At farm level, the results were presented and discussed per farm type, allowing to identify some plausible strategies for reducing the TFI, adapted to the constraints of each farm type. The slope of the trade-off curves between TFI and the gross margin, per farm type, was widely discussed as it allowed the identification of more susceptible and robust farm types for the reduction of pesticide use and its effect on land use. The potential of forages crops to reduce the TFI was a hypothesis of these stakeholders which was confirmed by the evaluation of different scenarios of development of these crops in different farm type. The plausibility of the development of simplified rice cropping system, simulated by the BEM, was also discussed as it corresponded to a possible scenario where regulation on herbicides would trigger a reduction of the “chemical false sowing” currently practiced.

Another objective of these stakeholders was to evaluate to which extent the TFI could be reduced without reducing the area under rice cultivation, as these stakeholders recognized the need to maintain rice cultivation in the area. As the results of these scenarios differed among farm types and soil types, the stakeholders realized that there was a room for decreasing pesticide use and developing OF. However, the TFI threshold could not be attained by clear cut policies and hardly without decreasing the rice area. Local policies (such as agri-environmental measures) could therefore be developed and targeted to specific farm types and soil types, provided further discussions are conducted with farmers, to identify and negotiate attainable objectives.

The result at regional scales provided the stakeholders with two new angles of visions on TFI reduction:

- When setting the TFI constraint at the regional level, the practical reduction per farm type showed that the specialized rice producer has more room for maneuver in the reduction of farm TFI (and greater impact in the regional TFI) than other farm types such as the livestock breeder, already a low user of pesticides. They found interesting to focus their efforts in the reduction of pesticides to some farm types. Here again, more information

was found necessary, notably on trajectories for pesticide reduction and discussion with farmers was found necessary by the stakeholders.

- Besides the extension of forage crops, the fact that the model also proposed maize as a land use option, raised the question of the potential of this crop as well as the rainfed sorghum. The classical vision of the Camargue agricultural system was based on rice/durum-wheat rotation, while other crops such as sorghum might be more profitable than durum-wheat and their potential for development should be discussed with farmers also in terms of its advantages in terms of pesticide use reduction.

Concerning the development of OF, the interest of the stakeholders was at farm level, but also at sub-regional and regional level, to identify if some sub-region within the Camargue could be more easily converted to OF than others. However, this analysis is still ongoing as sub-regional analyses were not completely achieved during the phase of the project reported in this paper.

The high economic profitability of OF did not surprised them, and they hypothesized that behind technical issues, the development of OF would be driven by the supply chains industries that set contracts with farmers. However, they also recognized, as in the case of the CAP reform scenario, that the variability of prices and the relative price difference between conventional and organic products plays a crucial role in such profitability. Stakeholders wondered on the possible means to keep the current difference.

5. Discussion and conclusion

5.1. Stakeholders evaluation of the approach

The evaluation of the approach by the stakeholders was done through individual interviews conducted between two and three month after the evaluation of scenarios (Phase 3). A semi structured interview was conducted using guiding questions related to what they retained of the scenario analysis and their opinion on the global framework. It was also discussed to which extend their institution could benefit from such scenario analysis and the possible improvement they would suggest about the model, data and scenarios. This information was also re-discussed while writing this paper, as three stakeholders of the region are co-authors of this paper. In the next paragraphs we have synthesized their opinion and organize them by phase.

5.1.1. Phase 1: Data and model hypothesis

The first phase was dedicated to the discussion of the data and to the principles of the BEM. The schedule of this phase was different among the stakeholders: the FURPI knew already the data as they were engaged in the process of data acquisition (see chapter 5 in Delmotte (2011)) and had participated in another interactive simulation exercise using the same data (Delmotte *et al.*, Submitted-b). The RNPC and SMCG had heard about the data acquisition phase as they provided part of it, in particular for the farm typology. Both stakeholders acknowledged the large amount of data that had been formalized in the description of agricultural activities. The degree of detail and the sources and methodologies used for the acquisition were found of great importance by the local stakeholders. The farm typology was also seen as an important formalization of data as, up to now, there was no description of agricultural systems at farm scale. However, stakeholders found the nine types of farms to be too detailed and, at least for most part of the analysis and discussion of scenarios, they preferred to analyze only four contrasted types, and only in some cases the nine types have been presented.

Discussions also concerned the selection of indicators to be calculated for the scenario evaluation. While the variety of indicators that could be calculated was acknowledged by the stakeholders, as well as the fact that they participated in their selection, they regretted that it was not possible to calculate net margins instead of gross margin, as some changes like diversifying the production or converting to organic, might necessitate investments that could become limiting. However, it was not possible to acquire the data that would have allowed the calculation of this indicator.

5.1.2. Phase 2: Scenario development and model co-building

The first positive point mentioned by the stakeholders related to this phase is their participation in the scenarios development. They appreciated to have the opportunity to choose the issues to treat in the scenarios and appreciated the stakeholder-researcher collaboration in the formalization of the scenario in a BEM in a transparent way (i.e. setting up parameters, constraints). Stakeholders underlined the importance of having followed the progressive development of the BEM: starting with a simple model and progressively adding complexity to reach a model giving results close to reality. This was found necessary to ensure a better understanding the processes included in the model, its main principles and limits and to improve the analysis of results.

For example, discussions occurred about the definition of the objective function and of the parameters for the simulations. These discussions were important for co-building the model as stakeholders were made aware of the BEM potentialities and knew that some important aspects, such as farmers' attitude towards risk, were not integrated. Another example is the choice of the reference values to analyze scenarios related to the reduction of pesticide use. This was defined together with the RNPC and the post 2014 CAP reform scenario was used to provide reference values for different indicators.

Other discussions focused on the potential use of the model to delineate and evaluate different trajectories among the scenarios evaluated (e.g. the conversion to OF or the gradual reduction of the IFT). However it was made clear to the stakeholders that for such questions, a more complex model (probably based on dynamic linear programming) would be needed and that for a first approach to these issues a static image could be sufficient.

5.1.3. Phase 3: Scenario evaluation

The importance of discussing and simulating a reference scenario to provide values of indicators for the current situation has been highlighted by the local stakeholders. In some cases, reference scenario was not necessary as the stakeholders had already a reference value for some indicator (e.g. the area under rice). For other indicators for which they did not have a reference value (e.g. the TFI), the reference scenario served them to set a reference value and compare other scenarios in relation to the current situation.

Stakeholders highlighted the difficulty, during the evaluation of scenarios, to step back from the detailed analysis of several indicators and scenarios and identify the "take home messages". To overcome this, would require that both researchers and stakeholders work together to synthesize the knowledge gained from the scenario assessment.

The FURPI highlighted the relevance of this tool in the time and context in which it was presented to them as the CAP reform is imminent and they were in the process of negotiation with national authorities. This tool was considered as a way to deepen the evaluation of the plausible impacts of the evolution of the subsidies system at regional level and gave elements (if not all) for the making of a briefing document for the state agencies.

The RNPC foresaw the possibility with such model, to get quantitative data at different scales of interest, and not only at regional scale. It was also envisaged to use the model for

prospective analysis of specific sub-regions where key issues are at stakes such as drainage basin that feed the protected wetlands hosting local bird species.

5.2. About the scenarios of evolution of agriculture in Camargue

The scenario analysis related to the CAP reform showed that the farming systems in the Camargue region are greatly dependent on subsidies, especially those specialized in rice production. In the short term, the suppression of the current rice coupled payment (planned for 2012) might not affect the farm economy, as it would be compensated by a re-evaluation of the level of direct payment on the basis of a year of reference for each farm. However, in the long term and based on the scenarios evaluated for the post 2014 CAP, a decrease of gross margin can be expected in most of the farm types. As a general rule, the more diversified the farm in terms of cropping systems, the less affected it was by changes in the CAP reform.

The FURPI, in their negotiations with the French ministry of agriculture for establishing the coupled aid to rice finally claimed for 250 €/ha¹ of coupled payment, but no agreement was reached. Taking into account the average prices of 2009, this coupled payment could have the expected effect in encouraging farmers to continue growing rice. However, without any coupled payment, and unless high rice price and low wheat price occurred, farmers could be tempted to reduce the area under rice cultivation, especially for the one that are currently specialized in rice production. The impact of these plausible changes on farm land use (e.g. crop diversification, conversion to OF), when aggregated at regional scale, would have consequences on the activities of the processing industries, as the volume of rice for collection and processing would decrease. The decrease in rice area would also affect the water dynamics of this deltaic region as well as agricultural employment. However, this decrease in area under rice cultivation, although uncertain and directly linked to prices of products and subsidies, may have also positive impacts on the environment, through reduction of pesticide use. There might be then a trade-off between maintaining the water dynamics of the region and hydrologic equilibrium by rice cultivation and objectives of pesticide use reduction and OF development.

In the scenarios related to the reduction of pesticides use and OF development, the post 2014 CAP reform is used as a reference scenario, as this reform was imminent at the time of this study. These scenarios could be qualified of midterm scenarios compared to those related to the PAC reform itself which are short-term (2012-2014). The reason of this choice for

reference scenario was based on the fact that it is for the period 2018-2020 that local stakeholders are expected to attain the environmental objectives of the French government.

Based on the results of the BEM and the discussion with stakeholders, the CAP reform, might have a positive impact on the objective of reducing the pesticide use, by the reduction of the rice area or, alternatively, by dis-intensifications of the rice cropping systems in terms of pesticide use. We studied with the stakeholders the loss of economic performance at farm level that would result from the adoption of such system and the plausible impacts of such adoption at regional level on agricultural production and pesticide use. It appeared to stakeholders that it is possible to reduce pesticide use with an affordable loss of economic performance. These results raised the issue of the possible means to encourage these changes at the cropping and farming systems level and discussion were held on possible agri-environmental measures (AEM) to be implemented for such reduced pesticide use. However, in the current system, many eligibility restrictions (such as the age of the farmer or the administrative farm status) avoid a great number of farms from Camargue to apply to such AEM.

The extension of OF seems to be economically attractive, with the current price situation and according to our data. However, as pointed out by stakeholders, this attractiveness is closely related to the current status of OF markets that are mostly national or even regional niche market. Further development of the production of OF may push prices down and therefore decrease the economic attractiveness of this type of farming. This issue needs to be studied in more detail. As pointed out by Darnhofer (2009), the generalization of OF could twist into a phenomena of “conventionalization”, and therefore prices of organic products might get closer to conventional prices and also the practices might rapidly evolve and diversify rendering figures used in this study not valid any more.

5.3. Final remarks and further research

The first remark is related to the data used in the model. The collaboration with stakeholders started by the solicitation of the FURPI and of the RNPC for sharing data and for discussions about their analyses. The FURPI provided data on the technical aspects of rice cultivation as well as some basic economic data. The PNRN provided the data on land use that were used to make the typology. These two stakeholders were willing to see how this information was integrated with other data. With the SMCG and the COOP that did not participated in data collection and processing, it started by the presentation of the data available. This thorough

sharing of the data available and their source and collection methods was of primary importance for interpreting results of the BEM as it often necessitated going into details related to the data on crop performances, the farm typology and main parameters. We therefore acknowledge the importance of an early involvement of stakeholders for the data acquisition that facilitate its legitimization for further analysis of scenario results.

The second remark is related to ensuring a basic understanding of the principles of a BEM via co-building the model. Starting with a simple model (see section 3.2) and progressively engaging stakeholders in the definition of scenarios and their formalization in the BEM was found crucial for further assessment of scenarios. As at the beginning, the stakeholders had only a limited view of the concepts of scenarios, it was necessary that the researchers interpret the ideas of the stakeholders to create a first and simple scenario, and then use it to deepen the discussion about the range of scenarios stakeholders wish to evaluate and about the knowledge and processes that must be taken into account in the model. However, being totally transparent while working with stakeholders was found difficult. For example, risk is not taken into account in the objective function of the BEM while its influence on farmers' decision making is widely recognized. This choice was done in agreement with the RPU that therefore had a clear view of this limit of the model. However it might not be the case of the other stakeholders and even if this choice is explained, they might not totally realize the underlying assumptions that support this choice. Total transparency from the researcher team to explain what the model can and cannot do is therefore required. This could be achieved by keeping traceability in the choices done, notably through regular writing and sharing reports about the building of the model. However, this transparency must be reciprocal. When working with multiple stakeholders with sometimes conflicting interest, it is necessary that their objectives in participating to such scenario evaluation process are shared to ensure that none would take advantage of the scenario or manipulate participants in the project (researcher or other stakeholder). Transparency is therefore required from the stakeholders via the expression of their objectives (Etienne, 2010). This phase of model co-building created enthusiasm in both researcher and stakeholders' points of view, as a kind of co-learning occurred on model functioning and stakeholders' objectives.

Sterk (2007) stated that a prerequisite for successful participation of stakeholders in the use of BEM for scenario analysis is the close collaboration between scientist and stakeholders through all phases of model building and use. Our experience is a clear demonstration of that point. The interactions between researchers and stakeholders in Camargue around the co-

construction of the BEM have produced new knowledge and visions of plausible futures for the region. The synthesis of the results presented in this paper ‘reflect faithfully what was discussed during the evaluation of the scenario’, as mentioned by the representatives of the RNPC while writing this paper. The fact that stakeholders were involved in all phases of model construction, from the acquisition of data to the progressive model development and analysis of results gave them confidence in the analysis about the future of agriculture in Camargue and the questions they could address with database and BEM model developed in this study.

In the study presented in this paper, individual meetings with stakeholders were the basis for model development and scenario analysis. Group meetings among different stakeholders, to share their points of view and make a collective analysis of the plausible futures for agriculture in Camargue, had been explicitly asked by stakeholders and it is the objective of our current efforts in the region. However, it was believed necessary to first carry out the four phases of the approach individually, to enhance understanding and confidence in the model and in the approach, before organizing collective discussions where the points of view of different stakeholders would be expressed and confronted.

Finally, stakeholders suggested to present and discuss these results with farmers from Camargue and other important stakeholders in the region (such as the COOP), to integrate their points of view in the assessment of the plausible futures that were simulated. Our current efforts are directed towards this enlargement of participating stakeholders in further development of the BEM and the analysis of scenarios. Also, the articulation of this approach with another modeling approach based on interactive simulation with farmers through an agent based model is a pathway to be explored for enhancing collective integrated assessment of scenarios at multiple scales by farmers and local stakeholders.

Acknowledgments

The authors wish to thank the French Environment and energy Management Agency (ADEME) and the internal committee for organic farming (CiAB) of the French National Institute of Agricultural Research (INRA) for financial support. We are also grateful to Jacques Wery for its comment on an earlier version of the manuscript.

Appendix: The resulting model after the co-construction process.

Along the process of participatory evaluation of scenarios, five versions of the BEM were presented and discussed. The model was progressively enlarged and adjusted driven by the explicit demand of stakeholders or the identification and discussion of some unreasonable results (Cordier, 2011). The model was programmed in GAMS 23.5, and in this section we present the resulting version used for the evaluation of scenarios (see next section).

The basic components of the model are (i) the variable for optimization (ii) the agricultural activities taken into account (iii) the technical coefficients of such activities, (iv) the indicators calculated that can be used either as an objective to be maximized or minimized or a constraint in terms of a desired maximum or minimum value of such indicator (v) the base constraints of the model in terms of resources available and agronomic constraints and (vi) the parameters representing exogenous condition such as prices and subsidies (Figure A1). Results produced by the model include the value of different indicators under specific scenarios for allowing their comparison and the trade-off curves between two indicators by maximizing one while setting the other as a constraint and progressively relaxing it or tighten it (Figure A1).

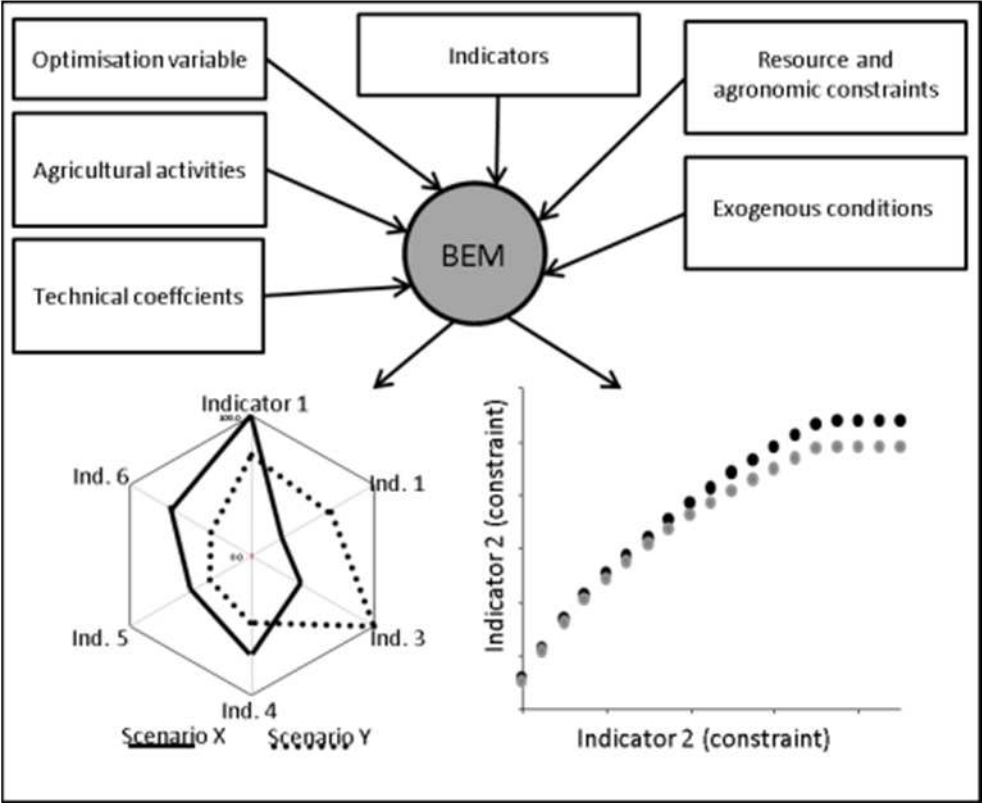


Figure A1: Functioning of the Bio Economic Model and main types of results.

The number of activities used in the first versions of the model was limited as the objective was to show the functioning of the model to stakeholders (i.e. in an intermediate version of the model only rice and wheat were included as these are the two most important crops). In the final version produced during the model co-construction process, 1200 activities were included. An activity being a combination of a crop, established in a soil type, with a preceding crop, a distinct management system and a given level of input use (see table A1 and chapter 4 in Delmotte (2011)). Due to the lack of references related to organic cropping systems in the region, only one intensity level was described for organic activities.

Table A1: Definition criteria for the cropping activities in Camargue.

Determinants (sub-indices)	Number of variants	Description of variants
Soil types (S)	4	Deep loamy clay soils (DLC), deep sandy soils (DS), shallow loamy clay (SLC), alluvial hydromorphic soils (AH).
Crops (C)	10	rice (r), durum wheat (w), alfalfa (a), oil seed rape (c), sunflower (t), sorghum (s), maize (m), lentil (l), soy bean (b), pasture(p)
preceding crops (PC)	10	rice (pr), durum wheat (pw), alfalfa (pa), oil seed rape (pc), sunflower (pt), sorghum (ps), maize (pm), lentil (pl), soy bean (pb), pasture(pp)
Management techniques (M)	2	conventional (c), organic (o)
Intensity levels (I)	2	Simplified (s) and intensive (i)

These activities were quantitatively described by their input and outputs in the form of a database. These inputs and outputs, technical coefficients, are used for the calculation of indicators at different scales (see Box A1). Inputs for the different activities (fertilizers, pesticides, seeds, machinery and fuel) were calculated based on several technical reports from the region, 14 reports of student interviewing farmers and a series of interviews to key farmers were carried out to complete the data (LeQuere, 2010). Labor demand was quantified from a detailed description of each cropping system, with tractor and machinery use and the time needed for each operation as well as the period or realization. Rice yield was estimated based on a database analysis containing more than 350 fields surveyed in different years (Delmotte *et al.*, 2011). Yield for the other crops was estimated together with experts from

local technical institutions or using average yields reported for the region. Table A2 presents the main sources of information used to calculate the technical coefficients (more details on the calculation can be found in chapter 5 in Delmotte, 2011).

Table A2: Technical coefficients and source of information used.

Coefficient	Source of information
Yield (YIELD) t.ha ⁻¹	Crop growth models, statistics and expert knowledge
Fertilizer used (FERT) €.ha ⁻¹	<ul style="list-style-type: none"> - Interview with farmers and input suppliers. - Technical reports - Interviews with experts - Data Base from the FURPI
Pesticide use (PEST) €.ha ⁻¹	
Seed needed (SEED) €.ha ⁻¹	
Fuels consumed (FUEL) l.ha ⁻¹	Databases (Gembloux machinery data base, Central Office of Agricultural Machinery (French ministry of Agriculture, BCMA))
Labor needed (WORK) h.ha ⁻¹	<ul style="list-style-type: none"> - Detailed description of farmers cropping systems and machineries availability from interviews. - Interviews with experts.
Machinery use (MACH) €.ha ⁻¹	Detailed description of machineries used from interviews and Competilis® software (Arvalis – Institut du Végétal)
Treatment Frequency Index (TFI) no unit	<ul style="list-style-type: none"> - Detailed description of farmers cropping systems from interview with farmers - Data Base from the FURPI

The variable for optimization in the BEM is the area (X) of land of an specific soil type (S) devoted to a particular crop (C) with a previous preceding crop (PC) under a specific management strategy (M) and its level of intensification (I) (See table A1).

$$X_{S,C,PC,M,I}$$

Indicators are computed by multiplying the area under each activity by the relevant coefficients. Box 1 shows the equations used for computing most indicators in the BEM model. The description of the technical coefficients is given in table A2 and the meaning of indices in the variables and parameters is given in Table A1.

Box A1. Equations used in the BEM for computing indicators in the scenarios assessment of agricultural change in Camargue. It has to be mentioned that the gross margin for livestock breeder is globally overestimated, as it is considered that the whole forages produced are sold while in reality it is self-consumed by the livestock.

Costs of Production (COSTS)

$$\begin{aligned} COSTS = & \sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,C,PC,M,I} * FERT_{S,C,PC,M,I} * PRICE) + \sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,C,PC,M,I} * PESTS_{S,C,PC,M,I} * PRICE) \\ & + \sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,C,PC,M,I} * SEEDS_{S,C,PC,M,I} * PRICE) + \sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,C,PC,M,I} \\ & * FUELS_{S,C,PC,M,I} * PRICE) + \sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,C,PC,M,I} * MACH_{S,C,PC,M,I} \\ & * PRICE) + \sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,C,PC,M,I} * WORK_{S,C,PC,M,I} * PRICE) \end{aligned}$$

Gross Margin (GM)

$$GM = \sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,C,PC,M,I} * YIELD_{S,C,PC,M,I} * PRICE_{C,M}) - \sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,C,PC,M,I} * COSTS_{S,C,PC,M,I})$$

Gross Margin with Subsidies (GMS)

$$\begin{aligned} GMS = & \sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,C,PC,M,I} * YIELD_{S,C,PC,M,I} * PRICE_{C,M}) - \sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,C,PC,M,I} * COSTS_{S,C,PC,M,I}) \\ & + \sum_{S,C,PC,M,I} (X_{C,M} * AIDES_{C,M}) \end{aligned}$$

Amount of Subsidies (SUBSIDIES)

$$SUBSIDIES = \sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,C,PC,M,I} * AIDES_{C,M})$$

Total Value of Agricultural Production (VA)

$$VA = \sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,C,PC,M,I} * YIELD_{S,C,PC,M,I} * PRICE_{C,M})$$

Total working time (TWT)

$$TWT = \sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,C,PC,M,I} * WORK_{S,C,PC,M,I})$$

Employment Generation in agricultural activities (EMPLOY)

$$EMPLOY = (\sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,C,PC,M,I} * WORK_{S,C,PC,M,I})) / 8$$

Treatment Frequency index (TFI)

$$TFI = (\sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,C,PC,M,I} * TFI_{S,C,PC,M,I})) / SAU$$

Water used for irrigation (WATER)

$$WATER = \sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,C,PC,M,I} * WATER_{S,C,PC,M,I})$$

Proportion of irrigated area (IRRIG)

$$IRRIG = \sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,r,PC,M,I})$$

Area Organically Managed (ORG)

$$ORG = \sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,C,PC,o,I})$$

These indicators might be relevant at different scales and in some cases may look redundant. For example, total working time is a relevant indicator for the farmers while employment generation is relevant for stakeholders at a higher aggregation levels. For the later, aggregation was done using the typology described in table A3. Also, some indicators not presented here as equations, and useful for regional stakeholders, where related to the surface and total production per crop.

The objective function in the BEM is the indicator that is maximized or minimized resulting in a specific configuration of cropping activities. All stakeholders identified the Gross Margin with Subsidies (GMS) of farms as the objective to be maximized and, at regional level, the sum of the gross margins of all farms. The other indicators can be used as constraints and in the scenarios assessment with the SMGC and PNRC, desirable levels of TFI were set as constraint while maximizing GMS.

The optimization was done under two types of constraints, those related to resource availability at different scales and a series of agronomic constraints. Resource constraints at the farm scale are defined by the area available per soil type. To represent farm diversity, a farm typology was built on the basis of multiple data sets: (i) farmer declaration for payments of the Common Agricultural Policy, (ii) geo-referenced soil and land use data from the SMCG and the National Reserve of Camargue, and (iii) data from a farm survey carried out in 2009 (Jaeck *et al.*, 2009) (for more details see Chapter 4 in Delmotte, 2011). Nine farm types were defined in relation to their size, main agricultural activity and orientation in terms of organic and conventional farming. At the (sub) regional level, land resource availability in terms of surface per soil type was obtained from the aggregation of a spatially explicit representation of farm types per sub region (Table A3).

Table A3: Description of the farm typology. *This typology is based on the rice and organic proportion in the farm area and on the presence of livestock breeding activities. Figures are presented that are used for aggregation of the modeling results at farm scale, to the sub regional level (Camargue Gardoise, Grande Camargue and Plan du Bourg) and at the region level Camargue). Each farm has a proportion of land of each soil type (DS: Deep Sandy soils, DLC: Deep Loamy Clay soils, SLC : Shallow Loamy Clay soils, AH: Alluvial Hydromorphic soils).*

Farm type	Proportion of area of each soil type				Proportion of the cultivated area under:		Total area (ha)			
	DS	DLC	SLC	AH	Rice	Organic	Camargue Gardoise	Grande Camargue	Plan du Bourg	Camargue
Specialized rice producer	5	20	53	22	80%	0%	4122	4459	797	9378
Rice producer	5	35	43	16	60%	0%	1232	4525	1583	7341
Partially organic rice producer	4	31	53	12	60%	21%	1021	3033	1585	5640
Diversified crop producer	3	45	41	10	30%	0%	2164	2601	376	5142
Partially organic diversified crop producer	0	12	88	0	30%	20%	443	43	0	487
Organic diversified crop producer	0	49	19	32	30%	100%	112	381	48	543
Livestock breeder	7	10	33	49	35%	0%	237	970	445	1654
Partially organic livestock breeder	20	15	27	37	35%	43%	138	1198	26	1363
Organic livestock breeder	7	37	19	37	10%	100%	10	414	152	577
Total							9483	17627	5017	32127

Some agronomic constraints were included in the last version of the model to force it to give more realistic results, with regard to stakeholders' opinion (See section 3.3). For example, in earlier versions of the model the FURPI pointed out inconsistencies in the results such as the absence of rice on alluvial hydromorphic soils while in practice, rice is necessary in this types of soils for desalination. Also, some incoherent crop successions were identified such as cultivating oil seed rape after rice, while it is not realistic to sow oil seed rape after rice harvest. Based on Schaller (Schaller, 2011) five types of agronomic constraints were identified from farmer interviews and observations of interactive simulation exercises for cropping plans (Cordier, 2011; Maily, 2011): unsuitable cultivation area (soils) for each crop, preceding/following crop pairs, stable cropping plan, minimum crop return time and maximum number of successive cycles (Table A4).

Table A4: Description of the type of agronomic constraints introduced in the model, their equation and an example.

1	Unsuitable cultivation area. Where a specific crop (i) is not suitable for a specific soil type(i)	
	$\sum_{S,C,PC,M,I} (X_{i,i,PC,M,I}) = 0$	e.g. Impossible to sow alfalfa, maize, colza, sorghum, lentil and soy bean in DLC and SH soils.
2	Preceding/following crop pairs. Where an specific crop (i) cannot be under an specific preceding crop (j)	
	$\sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,i,j,M,I}) = 0$	e.g. Impossible to sow maize and sorghum after rice
3	Stable Cropping plan. Where the area for an specific preceding crop (i) corresponds to the area under such crop (i)	
	$\sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,i,PC,M,I}) = \sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,C,i,M,I})$	e.g. there must be as much rice in the cropping plan as the surface under rice as preceding crop
4	Crop return time. Where the area under an specific crop (i) cannot exceed the total area (SAU) divided by the minimum number of years for a crop to be able to be cultivated again (MinR)	
	$\sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,i,PC,M,I}) \leq \frac{SAU}{MinR}$	e.g. sunflower can only be cultivated one out of three years (MinR = 3)
5	Number of successive cycles. Where the area under a specific couple crop (i)-preceding crop (i) should not exceed a maximum number of cycles (MaxNC).	
	$\sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,i,i,M,I}) \leq \frac{\sum_{S,C,PC,M,I} (X_{S,i,i,M,I})}{MaxNC - 1}$	e.g. alfalfa after alfalfa cannot exceed twice the area of alfalfa after other crop (MaxNC = 3, meaning maximum three successive alfalfa).

Exogenous conditions are parameter used for the calculation of economic indicators. They include the prices of inputs and products as well as subsidies. Average prices of inputs (fertilisers, pesticides, seeds, machinery and fuel) were provided by input suppliers; the price of water for irrigation was averaged from the prices 2009 in all irrigation perimeters of Camargue. Prices of products were provided, for 2009-2010, by the COOP. Prices for organic products were provided by farmers and the COOP. Subsidies included direct payments, coupled payments for rice and durum wheat as well as subsidies for conversion to organic agriculture. The direct and coupled payment levels were the average value reported by the FURPI, while current subsidies to support conversion to organic agriculture were obtained from the Agence Bio³⁰. Prices of products and subsidies were widely discussed with stakeholders as they played an important role in the construction of scenarios to be assessed (See section 3.3.1).

³⁰ <http://www.agencebio.org/>

Synthèse partielle

Dans ce chapitre, nous avons présenté une démarche permettant d'associer les acteurs locaux d'un territoire au développement d'un modèle bioéconomique. Leur association permet de s'assurer qu'ils en comprennent le fonctionnement et les hypothèses, et que tous les processus importants y soient représentés. L'usage de ce modèle avec les acteurs pour évaluer différents scénarios a permis d'identifier plusieurs voies d'évolution des systèmes agricoles camarguais, ainsi que leurs conséquences possibles. Cette application a également permis d'identifier des usages possibles de ce type d'outils pour les acteurs du territoire.

Chapitre 8 : Discussion générale

Dans ce dernier chapitre, nous revenons, dans un premier temps, sur la démarche mise en œuvre. Nous discutons les intérêts et les limites des méthodes utilisées et les résultats obtenus, à la fois pour chaque phase de la démarche (voir figure 1.6 dans le chapitre 1) ainsi que pour celle-ci dans son ensemble.

Dans une deuxième partie, nous discutons des apports de la mise en œuvre de la démarche pour les questions relatives à l'évolution des SPA en Camargue. Deux échelles sont distinguées, l'exploitation et la région, et nous traitons également des apports liés au fait de considérer ces deux échelles simultanément.

Enfin dans une dernière partie, nous proposons un regard critique de la démarche au regard des quatre propriétés revendiquées : la participation des acteurs, la prise en compte d'échelles et de critères multiples et enfin la valeur prospective de l'analyse.

1. Analyse critique de la démarche de construction et d'évaluation de scénarios

1.1. Phase 1 : Identification et engagement des acteurs, définition des scénarios, critères et indicateurs

1.1.1. Identification et engagement des acteurs : la clé de voute d'un projet de recherche participative

L'identification des acteurs est une première phase clé dans une démarche participative de construction et d'évaluation de scénarios (Faure *et al.*, 2010; Mathevet *et al.*, 2010; Neef *et al.*, 2010). Plusieurs travaux mentionnent le fait que la liste des acteurs doit être élargie au maximum pour intégrer tous les acteurs porteurs de connaissances sur le sujet traité, ou susceptibles d'être impactés par les évolutions des systèmes considérés (Patel *et al.*, 2007; Kok *et al.*, 2009).

Dans notre cas, la connaissance approfondie de certains acteurs camarguais par l'équipe de recherche a permis de facilement les identifier et de susciter leur curiosité, puisque ceux-ci connaissaient également, pour la plupart, les activités de l'INRA en Camargue. Pour un projet de recherche de courte durée tel que celui-ci, cette connaissance préalable d'un nombre important d'acteurs a été un atout majeur pour que les réflexions sur l'agriculture dans le territoire et ses évolutions puissent être rapidement mises en place.

Les acteurs pertinents dépendent de l'objet de recherche (Jepsen *et al.*, 2009), la définition de celui-ci ayant permis d'opérer un élargissement de la gamme d'acteurs impliqués. En effet, lors des discussions avec les premiers acteurs identifiés, ceux-ci ont indiqué d'autres partenaires avec qui ils interagissaient. Nous avons pu ainsi identifier de nouveaux acteurs qu'il semblait important de rencontrer. Les analyses de réseaux d'acteurs, telles qu'elles sont conduites en sociologie, pourraient contribuer à la sélection des acteurs nécessaires à la conduite d'évaluation participative de scénarios, en produisant des informations sur la nature et l'intensité des relations entre les acteurs et les rapports de force existant entre ces derniers (Degenne *et al.*, 2004). D'autres méthodes, encore, pourraient être utilisées, notamment les matrices d'importance/influence des acteurs (Dearden *et al.*, 2002), ou l'analyse des conflits (Hjortsø *et al.*, 2005).

Cette phase de rencontre des acteurs est d'une importance cruciale pour la compréhension de leurs domaines d'actions, de leurs interrelations et pour identifier, parmi l'ensemble, ceux qui (i) sont pertinents et qui doivent donc être associés à l'étude, et qui (ii) semblent réellement prêts à investir des moyens et notamment du temps. Les acteurs pertinents peuvent être choisis par rapport à leur influence sur le développement des systèmes agricoles considérés. Dans notre cas les agriculteurs, le Syndicat des Riziculteurs de France et Filière ainsi que le Parc Naturel Régional de Camargue étaient des acteurs incontournables, alors que l'association des chasseurs pouvait être considérée comme ayant une importance secondaire. Les acteurs sont généralement très occupés et tous ne peuvent répondre favorablement. Convaincre les acteurs les plus importants de participer est alors une tâche fondamentale.

L'absence d'un acteur important peut, en effet, être une limitation majeure pour l'atteinte de résultats concrets sur le terrain (Etienne, 2010). Il est donc nécessaire de s'assurer que l'ensemble des acteurs identifiés comme importants participent au projet. Nous avons tenté, à partir de l'expérience de la démarche mise en œuvre en Camargue, de tirer quelques enseignements à ce sujet.

- Dans des cas où des conflits ouverts ou latents entre des acteurs sont identifiés, une alternative peut être de travailler avec chacun des acteurs séparément plutôt que de mettre en place directement des ateliers collectifs. Malgré nos explications et éclaircissements, les acteurs n'avaient probablement pas une idée très précise des types de résultats que pouvait produire l'analyse ; ou s'ils l'avaient, ils pouvaient en craindre la nature. Découvrir cela au cours d'une séance de restitution collective pouvait donc créer une

situation de grand inconfort, l'acteur pouvant aller jusqu'à se considérer comme « piégé ». Le fait d'avoir travaillé individuellement avec chaque acteur leur a permis de pouvoir réagir sur les résultats produits et de se créer leur propre opinion sur les scénarios. Ils semblent, dans ces conditions, être davantage en confiance pour accepter de participer ensuite à des travaux collectifs.

- L'objectif de ce travail, tel que nous l'avons présenté aux acteurs, était de nature méthodologique, et visait le développement et l'application d'une démarche d'évaluation de scénarios. Pour mettre à l'épreuve la démarche, il nous fallait traiter de questions finalisées, en l'occurrence les thèmes des scénarios. C'est leur participation à l'adaptation des questions finalisées qui les a encouragés à participer. Un projet de recherche flexible, quant aux questions finalisées auxquelles il souhaite contribuer, semble donc être une nécessité majeure pour la conduite de démarches participatives (Rossing, 2011). Dans la continuité de cette idée, il semble évident que travailler sur des thèmes d'intérêt commun consensuels permet l'engagement d'un plus grand nombre d'acteurs dans la démarche. Une fois ces acteurs engagés, il peut être plus facile de traiter de sujets qui ne mobilisent pas l'ensemble des acteurs.

1.1.2. Choix des critères et indicateurs : l'équilibre à trouver entre souhaitable et possible

La première étape du travail sur les critères et les indicateurs a consisté à familiariser les acteurs avec ces notions. La première identification des critères pour chaque acteur, nous a semblé être un bon moyen pour identifier leurs visions du monde, leurs missions et leurs objectifs. La traduction des critères en indicateurs, du fait des propriétés requises pour ceux-ci (voir chapitre 3 §2.4), nécessite des compromis. L'indicateur choisi ne doit pas forcément être le plus juste et le plus précis par rapport au processus « indiqué », mais le plus compréhensible et interprétable parmi les indicateurs pertinents par rapport au processus. Par exemple, l'indicateur utilisé pour évaluer l'impact de l'usage de produits phytosanitaires, l'indice de fréquence des traitements (IFT), est un indicateur de pression et non d'impact, très simplifié par rapport au processus, puisqu'il ne considère que le nombre d'applications de produits à dose homologuée. Or il est avéré que les impacts de ces produits dépendent fortement de leurs caractéristiques (par exemple leur rémanence et leur toxicité), et il existe d'autres indicateurs qui permettent de prendre en compte ces aspects (Bockstaller *et al.*, 1997; Bockstaller *et al.*, 2008). Cependant, ces derniers nécessitent beaucoup d'informations pour leur calcul, ne sont peut-être pas adaptés au cas de la riziculture inondée du fait du devenir des

produits dans la lame d'eau, et sont difficiles à analyser. L'IFT leur a été préféré pour ces trois raisons.

Il semble également pertinent que ces indicateurs aient une signification pour les acteurs. Les acteurs sont d'autant plus à l'aise avec un indicateur qu'ils ont l'habitude de l'utiliser et qu'ils possèdent des valeurs de référence pour celui-ci. En ce sens, le fait de calculer les indicateurs pour une situation de référence - qui peut être la situation actuelle - est une nécessité afin que les acteurs puissent utiliser les résultats comme point de comparaison pour évaluer les scénarios alternatifs. Par exemple, nous n'avions pas *a priori* considéré l'indicateur « surface cultivée en riz » comme pertinent pour les acteurs. Cependant il s'est avéré que c'était une variable que les acteurs utilisaient régulièrement pour juger de la valeur des systèmes de production mis en œuvre et pour lequel ils disposaient de références. Il était donc indispensable de le mobiliser.

Entre les souhaits des acteurs et les possibilités de calcul, des compromis ont dû être trouvés. Il nous a semblé indispensable, dès l'identification des critères et indicateurs avec les acteurs, de préciser ceux que nous pourrions calculer aisément, difficilement, et ceux qui ne pourraient pas l'être du tout. Ces choix sont liés à la nécessité de caractériser les systèmes et tributaires de l'inventaire des connaissances et données disponibles. L'exemple rapporté au chapitre 3, les impacts de changements de système agricole sur les populations d'oiseaux d'eaux, éclaire cet état de fait, et nous a conduits à ne pas considérer les oiseaux dans notre formalisation des systèmes.

Un autre constat est qu'il est difficile pour les acteurs de penser, dès le départ du processus de concertation, à tous les indicateurs qu'ils souhaiteraient mobiliser pour évaluer les scénarios, ceci sans avoir en une vision précise, ni d'exemples de sorties de calculs d'indicateurs. Aussi, le choix des indicateurs s'est révélé être un processus nécessitant de constantes adaptations au fur et à mesure de l'avancement du projet. Par exemple, pour un critère souhaité de performance économique des exploitations, seule la marge brute des exploitations avait été calculée dans un premier temps, et celle-ci avait été jugée recevable. Au fur et à mesure de l'acquisition des données et des premières évaluations de scénarios avec les acteurs, nous avons ajouté la marge brute avec et sans subventions, ainsi que la part des subventions dans la marge brute. Ces indicateurs sont partiellement redondants mais font sens pour les acteurs, car ils leur permettent des comparaisons avec d'autres situations, avec des valeurs seuils ou des valeurs calculées dans des scénarios de référence.

Finalement, peu d'indicateurs ont été mobilisés en comparaison avec d'autres approches qui en mobilisent un très grand nombre, comme par exemple MASC (Sadok *et al.*, 2009). Ce faible nombre s'explique (i) par notre volonté de rester dans une approche quantitative en maîtrisant au mieux l'incertitude, par rapport à ces approches très qualitatives et (ii) par les souhaits des acteurs.

1.1.3. Définition des scénarios : tensions entre problématique initiale du projet et participation des acteurs

La problématique initiale de la thèse portait sur l'évaluation des conséquences d'un développement généralisé de systèmes agricoles alternatifs, dont l'AB choisie comme exemple, à l'échelle de la Camargue. Un changement progressif de posture méthodologique s'est opéré : partant d'une démarche non centrée sur la participation des acteurs, cette posture de mobilisation des acteurs locaux a pris de plus en plus d'importance pour finalement devenir centrale.

En effet, la revue de la littérature a fait apparaître la nécessité d'associer les acteurs locaux du territoire, et si possible pour la totalité de la démarche d'évaluation de scénarios, pour que celle-ci contribue efficacement à leurs réflexions (Steyaert *et al.*, 2007; Giller *et al.*, 2008; Newig *et al.*, 2008; Neef *et al.*, 2010; Sterk *et al.*, 2011). Lors de la phase d'identification et d'engagement des acteurs, qui se déroulait via la présentation du projet et notamment de sa problématique appliquée³¹, il est apparu que celle-ci ne concernait que peu d'acteurs et n'apparaissait pas prioritaire, ce qui risquait d'exclure la participation d'acteurs importants du projet.

De plus, une seconde condition à la réalisation de ce type de projet est la possibilité de pouvoir disposer de données. Au cours des premiers mois de thèse, il est vite apparu que les ambitions en termes d'évaluation multicritères et multi-échelles allaient nécessiter un travail conséquent d'acquisition de données. Or, la plupart des sources possibles pour acquérir ces données se trouvaient être chez les acteurs de terrain.

Il est alors apparu difficile d'espérer mobiliser certains acteurs incontournables, soit pour le rôle qu'ils pouvaient jouer dans la construction et l'évaluation des résultats de la démarche, soit pour les données qu'ils pouvaient nous fournir, si la problématique appliquée n'était pas modifiée. La phase d'entretien avec les acteurs qui portait sur l'identification des scénarios a permis d'identifier un thème de travail qui semblait permettre de mobiliser plus d'acteurs et

³¹ Elle s'intitulait « Evaluation de scénarios de développement de l'AB en Camargue »

notamment plus de professionnels de l'agriculture. Ce thème, très fortement lié à la conjoncture actuelle, était relatif aux changements qui pourraient être consécutifs à la réforme de la PAC de 2013. Nous avons donc décidé de recentrer la problématique appliquée sur ce sujet, ce qui favorisait l'engagement des acteurs et permettait de pouvoir mener à bien l'acquisition des données, leurs discussions et validations avec les agriculteurs et autres acteurs professionnels agricoles, ainsi que de développer et tester avec eux les outils de modélisation.

Ce changement de problématique appliquée a eu un effet secondaire non prévu au départ : le travail autour de leurs questions d'intérêt et les résultats obtenus, nous ont conféré une certaine légitimité et permis d'acquérir un capital « confiance ». Il est alors devenu possible d'évoquer avec eux des scénarios qu'ils jugeaient initialement non pertinents, comme par exemple le développement de l'AB dans le territoire. De fait, nous avons finalement travaillé avec les agriculteurs et acteurs du territoire sur la problématique du développement de l'AB dans un contexte de changement de la PAC.

1.2. Caractérisation des systèmes agricoles à différentes échelles et description quantitative des activités agricoles : phases 2 et 3

1.2.1. Caractérisation des systèmes : faut-il associer les acteurs à cette phase ?

Les différentes étapes de la caractérisation des systèmes, proposées dans le chapitre 4, ont été discutées avec les acteurs. Cependant, des souhaits de scénarios portant sur des activités non-agricoles, exprimés lors des séances d'évaluation de scénarios, laissent à penser que cette caractérisation des systèmes n'a pas été suffisamment partagée. Les acteurs n'ont pas été associés explicitement à ce travail du fait de leur faible disponibilité et du temps nécessaire à la réalisation de ce type de caractérisation des systèmes.

Au regard de la littérature, de nombreuses études débutent par l'identification d'une problématique commune, et des méthodes sont proposées pour caractériser les systèmes avec les acteurs une fois cette problématique formalisée (Voir par exemple Etienne et al. (2011)). Il nous semble donc nécessaire, pour la réalisation d'un nouveau cycle de construction et d'évaluation de scénarios en Camargue, et maintenant que les acteurs sont engagés et qu'une relation de confiance mutuelle existe, de reprendre et de partager davantage cette caractérisation des systèmes, afin que les acteurs aient une meilleure vision des éléments qui peuvent être pris en compte dans l'évaluation de scénarios.

Un second point de discussion de cette étape de la démarche est relatif au choix des processus pris en compte dans les modèles de simulation. Certains de ces processus sont incontournables pour l'analyse des scénarios, mais les connaissances disponibles ne sont pas suffisantes pour qu'ils puissent être reproduits dans un modèle. Cela a été le cas des flux d'eau d'irrigation et de drainage, que nous ne pouvions modéliser et qui pourtant jouent un rôle central dans le fonctionnement des systèmes en Camargue, notamment au niveau de l'interface entre les systèmes agricoles et naturels. Le choix de ne pas modéliser ce processus a été justifié auprès des acteurs, ce qui a contribué à rendre explicite les limites des modèles développés. Si tous les modèles développés dans cette thèse avaient été co-développés avec les acteurs, ces choix auraient pu être pris en commun, et légitimés par les acteurs.

1.2.2. Caractérisation des systèmes et identification des échelles : quel niveau de détail ?

La caractérisation des systèmes à l'échelle de la parcelle est basée sur le concept d'activité agricole, appliquée au territoire camarguais. Le choix des critères de définition de ces activités (sol, culture, précédent cultural, mode conduite et niveau d'intrant) a été réalisé au fur et à mesure de l'acquisition et de l'analyse des données sur les systèmes de cultures (chapitre 5). Les différents systèmes ont été caractérisés avec différents degrés de détail, les systèmes les plus courants permettant et nécessitant plus de détails et de précision dans les données. Ce sont, en effet, les systèmes pour lesquels il existe le plus de connaissances formalisées. De plus, ce sont les systèmes que les agriculteurs connaissent le mieux et lors des simulations ils doivent pouvoir reconnaître leurs pratiques parmi les systèmes formalisés. Ainsi les activités rizicoles diffèrent sur la majorité des coefficients techniques, alors que les activités relatives à la culture de la lentille, par exemple, ne diffèrent que pour un précédent, en l'occurrence après un riz. L'exclusion des activités non réalisables du fait de contraintes agronomiques a permis de restreindre la description à 1200 activités, ce qui est déjà beaucoup en termes de base de données. Cependant, d'autres cultures et d'autres alternatives auraient pu être considérées, comme par exemple des cultures pérennes ou encore les panneaux solaires.

Il en est de même à l'échelle de l'exploitation agricole. La typologie proposée est relativement simple, par rapport à des typologies qui pourraient être basées sur des critères plus fonctionnels (Lopez Ridaura, 2011). La construction de celle-ci a été limitée par les données disponibles. Cependant, elle a eu l'avantage d'être facilement compréhensible et interprétable par les agriculteurs et acteurs. Il y a donc un compromis à trouver entre détail et complexité de la typologie d'un côté, et sa facilité d'interprétation, ce qui rejoint la discussion sur les

qualités des indicateurs (voir §1.1.2). Une typologie portant sur les trajectoires des exploitations agricoles pourrait avoir plus d'intérêt pour une étude sur la transformation des systèmes de production, comme par exemple sur le thème de la conversion à l'AB. Cependant, elle mettrait en œuvre beaucoup plus de déterminants (notamment sociaux) que ceux que nous avons pu modéliser et nécessiterait des données plus difficilement accessibles sur les exploitants, par exemple sur leurs objectifs et leurs stratégies.

L'identification des limites du territoire à considérer et des échelles d'intérêts des acteurs n'a pas soulevé de difficulté particulière, la plupart ayant une vision très claire du territoire sur lequel ils agissent, et des limites de celui-ci. Outre les échelles de l'exploitation et du territoire, qui sont rapidement apparues essentielles à l'analyse, des échelles intermédiaires ont été proposées par certains acteurs : les sous-régions administratives et bio-géophysiques (voir chapitre 4) et les bassins versants (ASA). Ces échelles d'approche ont un sens en termes d'évaluation et d'actions, pour certains objets (par exemple pour l'eau ou pour des politiques locales). Ce sont aussi des échelles pour lesquelles les acteurs ne disposent que de peu de données sur les systèmes agricoles, et ils étaient donc intéressés par toute formalisation de connaissances sur ces objets intermédiaires. Finalement, ces échelles ont été peu mobilisées dans l'évaluation des scénarios, ce qui pourrait être imputé au fait que les résultats à ces échelles n'ont pas été mis suffisamment en avant lors de la présentation des résultats des scénarios.

1.2.3. Description quantitative des activités agricoles courantes et alternatives : quelles méthodes pour quel coefficient technique ?

La quantification de coefficients techniques décrivant les activités agricoles s'est basée sur de multiples sources de données (cf. Chapitre 5). Les enquêtes réalisées dans des exploitations agricoles, complétées par l'analyse d'une base de données et par des dires d'expert, ont servi de base à la description des itinéraires techniques. Le calcul des différents coefficients techniques basés sur cette description, présente l'avantage d'un ancrage fort dans la réalité agricole camarguaise. Le fait que ces coefficients soient calculés sur la base des pratiques des agriculteurs leur confère une certaine validité aux yeux de ceux-ci. Combiner ces différentes sources de données semble donc pertinent pour quantifier les coefficients techniques directement liés aux itinéraires techniques, par exemple les coûts de production ou l'IFT, en vue de leur usage par les agriculteurs.

Le rendement et sa variabilité est un coefficient technique déterminant dans ce type d'étude car il est à la base des calculs des performances économiques et peut beaucoup varier. Parmi les méthodes possibles pour l'évaluation de ces coefficients techniques, les modèles de culture ont l'avantage majeur de pouvoir estimer la variabilité du rendement, notamment par rapport aux aléas climatiques et dans une large gamme de sols. Cependant ils ne permettent de simuler, la plupart du temps, que les rendements potentiels ou les rendements limités par l'alimentation hydrique, sans prendre en compte l'influence d'autres facteurs limitant : mauvaises herbes ou maladies par exemple. Utiliser des rendements produits par des modèles pouvait donc constituer une limite majeure aux yeux des agriculteurs et acteurs locaux. Par contre, l'analyse de la base de données issues du travail de diagnostic agronomique conduit en Camargue depuis plus de 20 ans (Delmotte *et al.*, 2011), présente l'avantage majeur de prendre en considération ces facteurs (climat, fertilisation, mauvaises herbes et maladies). Les acteurs et agriculteurs ont plus confiance dans des valeurs de rendement issues d'observations au champ que dans des simulations. Cependant cette méthode d'estimation du rendement présente le désavantage de nécessiter un travail considérable d'acquisition de données pour permettre de quantifier la variabilité liée aux aléas climatiques sur de longues séries de données. Ces deux approches pourraient être davantage combinées pour que les modèles mécanistes de culture permettent d'estimer la variabilité du rendement associée au climat, et que l'analyse de données de diagnostic agronomique permette de quantifier la contribution des autres facteurs à la variabilité du rendement.

Les valeurs des coefficients techniques des activités, produites par l'ensemble de ces sources de données, sont difficiles à valider, du fait notamment de l'usage de données d'origines multiples pour leur construction et de l'absence de sources externes qui permettraient de réaliser des comparaisons. Cependant, le fait que les acteurs et agriculteurs aient utilisé ces informations pour évaluer les scénarios, a permis de réaliser une étape de vérification supplémentaire. Celle-ci leur a conféré un statut de validité aux yeux des autres acteurs qui n'ont pas participé aux séances d'évaluation de scénarios.

1.2.4. Quel apport de ces formalisations de connaissances pour les acteurs

locaux ?

L'acquisition et la mise en forme des données sur les systèmes de culture camarguais à l'échelle de la parcelle ont rencontré un fort intérêt de la part des acteurs. Ceux-ci ont contribué, selon leurs moyens, à l'acquisition de ces données, notamment via la mise à disposition de celles dont ils disposaient. Tous ont également souhaités les avoir à disposition dès lors que leur analyse et mise en forme ont été achevées. Il faut noter que les seules données disponibles en Camargue jusqu'ici portaient uniquement sur le riz ou sur les systèmes riz-blé-luzerne (Tercia-Consultant, 2005). Celles-ci, déjà anciennes, ne décrivent donc pas l'ensemble des cultures existantes en Camargue, et ne sont pas aussi détaillées que celles que nous avons collectées et intégrées dans une base de données, considérées par les acteurs comme un produit essentiel de ce travail.

Les acteurs ont apprécié la quantification des coefficients techniques réalisée pour la majorité des cultures présentes en Camargue, qui leur permettra de pouvoir comparer la rentabilité des activités en fonction des évolutions de prix des productions. De nombreuses discussions ont porté sur les limites du jeu de données produit. Certains coefficients techniques n'ont pu être calculés en détail ni estimés, comme c'est le cas pour les coûts de gestion de l'eau et d'entretien des canaux d'irrigation et d'assainissement, ou pour les charges fixes des exploitations. Une seconde limite réside dans le fait que la diversité des pratiques mises en œuvre dans une exploitation peut être liée à d'autres activités présentes sur l'exploitation (la chasse ou l'agrotourisme par exemple) qui n'ont pas été prises en compte dans la formalisation de ces données, et dont l'influence n'a pu être évaluée. Au total, sur l'ensemble du projet, des données concernant plus de 40 exploitations agricoles ont été analysées, ce qui a contribué à légitimer celles-ci aux yeux des acteurs.

Les données sur les systèmes d'exploitation, notamment la typologie des exploitations agricoles et sa spatialisation, ont également fait l'objet de nombreuses discussions avec les acteurs du territoire. Le fait que l'intégralité des systèmes d'exploitation rizicole soit cartographiée et typée est une première en Camargue. Cette typologie spatialisée a été vue comme un bon outil pour assister les acteurs dans leurs réflexions sur le fonctionnement et les évolutions des systèmes agricoles. Certains acteurs ont été étonnés de la diversité des SPA et de leur répartition sur le territoire, en termes de nombre, de surface et de localisation. Une question majeure, qui n'a pu être entièrement traitée, porte sur le croisement des informations relatives aux systèmes de culture et au type d'exploitation. Un travail a été entrepris à partir

des données du SRFF et de la typologie pour croiser ces informations et vérifier si les systèmes de culture mis en œuvre différaient en fonction du type d'exploitation. Cependant, ce travail n'a pu aboutir, notamment du fait du changement de personnel au niveau de la direction du SRFF, et des multiples clauses de confidentialité liées à ces données.

1.3. Développement des outils de simulation et co-évaluation des scénarios : phases 4 et 5

1.3.1. Quels apports et limites de chaque approche de modélisation pour PIMPAAS ?

Plusieurs approches de modélisation complémentaires ont été identifiées au chapitre 2. Dans cette partie, nous revenons sur leur mise en œuvre en Camargue et sur leurs apports respectifs pour l'évaluation participative, multi-échelles, multicritères et prospective des systèmes agricoles.

Modélisation des changements d'usage du sol (Land Use / Cover Change).

Notre tentative de mettre en œuvre ce type d'approche s'est conclue par un bilan mitigé. Les limites des résultats obtenus nous ont conduits à ne pas présenter ce travail dans la thèse. Cependant les données mobilisées et leur analyse sont résumées dans Lopez Ridaura et al. (Submitted) (Annexe F). Un des problèmes qui s'est posé avec cette approche est l'échelle minimum (la taille du territoire) à laquelle elle peut être mise en œuvre. Dans le cas du territoire camarguais, dont les limites ont été définies avec les acteurs, peu de déterminants spatiaux peuvent être identifiés et quantifiés pour expliquer l'usage des terres, si ce n'est le type de sol. De plus, l'appartenance d'une parcelle à une exploitation est un facteur déterminant pour son mode d'usage des terres. Nous avons donc conduit une analyse spatialisée, en prenant en compte explicitement l'échelle de l'exploitation, ce qui n'est pas courant dans ce type d'approche, car cela nécessite de posséder l'information sur l'ensemble des exploitations couvrant le territoire, ainsi que les types de sols, pour expliquer la mise en valeur des terres. Cette analyse a produit des résultats, qui ont été discutés avec certains acteurs du territoire (Lopez Ridaura *et al.*, Submitted) et qui sont présentés dans l'annexe F.

Cette approche a finalement permis de vérifier et valider les connaissances sur le fonctionnement des systèmes, sur l'usage du sol et sur les trajectoires passées des exploitations. Cependant, l'identification de zones de changement probable d'usage du sol, qui est un résultat classique de ce type d'approche, n'a pu être produit, si ce n'est de manière qualitative et uniquement pour la question de la conversion à l'AB (voir annexe F). Développer ce type d'approche nécessiterait de travailler au grain de chaque exploitation

individuelle, et de compléter les informations spatialisées par des informations plus qualitatives permettant de comprendre les trajectoires des exploitations. Cette approche impliquerait donc une collecte supplémentaire de données, alors que notre base de données spatialisée est déjà plus détaillée que dans la plupart des études de ce type.

Modélisation multi-agents.

Cette approche s'est révélée très favorable pour l'engagement des agriculteurs ce qui confirme les résultats de la littérature (Castella *et al.*, 2005; Bousquet *et al.*, 2007a; Castella *et al.*, 2007a; Voinov *et al.*, 2010). Les sessions de simulations interactives ont permis de définir des scénarios qui avaient un sens concret pour les acteurs, de développer les réflexions et d'améliorer les connaissances mutuelles des agriculteurs, des acteurs locaux et des chercheurs sur l'agriculture en Camargue, et en particulier sur :

- les raisons de changements passés et de stratégies mises en place par certains agriculteurs ;
- certaines cultures, en particulier celles qui sont peu ou pas cultivées, comme le tournesol ;
- différentes stratégies possibles d'adaptation aux changements à venir, ainsi que sur les impacts de ces stratégies à différentes échelles.

Cette approche est un bon support pour les réflexions et discussions avec les acteurs locaux, et elle a également servi de base pour formaliser les connaissances sur la prise de décision technique dans les exploitations agricoles camarguaises (Mailly, 2011). C'est également une approche qu'il semble facile de présenter aux acteurs ; le fait que des agriculteurs y participent activement est un autre avantage pour donner confiance aux acteurs locaux vis-à-vis de la démarche et des résultats.

Modélisation bioéconomique.

L'approche de co-construction du modèle bioéconomique et d'évaluation de scénarios a permis de formaliser les objectifs principaux des acteurs locaux vis-à-vis de l'agriculture du territoire, ainsi que les contraintes qui pourraient limiter le développement de certaines activités alternatives. Des seuils ont été identifiés pour certaines variables, notamment pour le montant d'une aide couplée à la production rizicole. Des compromis entre les objectifs des différents acteurs ainsi que des situations où ces objectifs sont en conflit ou en synergie ont été relevés. Enfin, cette approche a produit des connaissances sur les impacts actuels et potentiels de mesures économiques et de réglementations locales, ainsi sur le développement d'alternatives techniques. Cette approche peut servir de support pour les acteurs en vue

d'activités de défense d'intérêts catégoriels auprès des institutions nationales ou européennes, et peut également servir de base pour définir des objectifs atteignables, comme par exemple sur la réduction des produits phytosanitaires.

Combiner ces approches permet ainsi d'obtenir des résultats de natures différentes. Les approches de changement d'usage du sol servent à identifier des changements « probables » à moyen terme (qui ont de fortes chances de se dérouler). La modélisation bioéconomique sert classiquement à identifier des situations, à long terme, qualifiable de « plausibles » (qui sont vraisemblables, imaginables). Finalement, les approches multi-agents permettent d'identifier des situations « possibles » à partir de l'évolution de la situation actuelle, à court ou moyen terme (qui ont un certain réalisme). Le « possible » prend explicitement en compte le présent pour imaginer le futur.

1.3.2. La co-construction des modèles est-elle toujours nécessaire ?

La construction des deux outils de simulation principalement mobilisés dans cette thèse a été réalisée de manière complètement différente.

Le modèle IMPASIAS (Delmotte *et al.*, Submitted-b), basé sur une approche multi-agents, ne nécessitait pas d'être co-construit car (i) c'est un modèle très simple, et (ii) il ne comporte aucun objectif spécifique nécessitant la participation d'agriculteurs ou acteurs locaux à la construction du modèle. Ce choix de construire un modèle simple s'est justifié par le fait que les agriculteurs et acteurs ne semblaient ni motivés, ni prêts à investir du temps pour la construction d'un modèle de façon participative.

Néanmoins, beaucoup de temps était dévolu au début des séances de simulation interactive à l'explication de l'outil utilisé ainsi qu'aux données servant de base aux calculs des indicateurs. De plus, deux acteurs ont suivi le développement de l'outil au travers de présentations de l'état d'avancement du modèle. Leur participation à l'organisation des séances de simulation interactive peut être interprétée comme un signe qu'ils comprenaient l'objectif et le fonctionnement global du modèle.

A l'inverse, la construction du modèle bioéconomique régional (Delmotte *et al.*, Submitted-a), et son usage, avait notamment pour objectif de formaliser les objectifs des acteurs locaux. De plus, le formalisme mathématique de ce type de modèle est complexe à expliquer. Il semblait donc nécessaire d'associer davantage les acteurs dans le développement du modèle bioéconomique, pour s'assurer que ceux-ci en comprennent les fondements ainsi que les résultats, plus difficiles à interpréter que les résultats du modèle multi-agents. De plus, deux

des acteurs qui ont participé à la co-construction de ce modèle avaient participé à une séance de simulation interactive, et tous les autres acteurs avaient assisté à une présentation des résultats du modèle multi-agents. Ce modèle a donc été développé à une étape du projet où les acteurs avaient une vision plus claire de ce que les modèles pouvaient leur apporter, à partir de leur expérience avec le modèle IMPASIAS. Le contexte était donc beaucoup plus favorable pour les engager dans la co-construction d'un autre type de modèle.

1.3.3. Vers une évaluation collective des scénarios ?

Les conditions de l'évaluation des scénarios ont été fonction des outils mobilisés. Les résultats du modèle multi-agent étaient interprétés dans un premier temps par les agriculteurs eux-mêmes, sans que nous ayons pré-analysé les résultats auparavant, ni que nous n'ayons un accès direct à l'analyse des résultats qu'en font les acteurs. L'évaluation collective des résultats des stratégies testées par chaque agriculteur a donné lieu à des discussions fournies, et mis en évidence des points de désaccord entre les agriculteurs par rapport à la faisabilité de certaines alternatives, comme l'AB par exemple. Les interactions avec les agriculteurs en fin de séances, ou lors des entretiens individuels post-séances, sont nécessaires car elles permettent de capitaliser l'information sur l'évaluation des scénarios par les agriculteurs. Elles permettent également d'identifier quelles sont les différentes stratégies d'adaptation des exploitations testées par différents types d'agriculteurs. L'évaluation des résultats à l'échelle de la région n'a pas suscité d'intérêt particulier de la part des agriculteurs, ceux-ci étant plus intéressés par les résultats à l'échelle de leur exploitation ou des autres exploitations. Une hypothèse pour expliquer leur manque d'intérêt à cette échelle est qu'ils n'ont pas d'objectif d'action à l'échelle de la région, contrairement aux autres acteurs du territoire tels que la coopérative ou les collecteurs privés.

Dans le cas du modèle bioéconomique, l'évaluation des scénarios a nécessité un travail important avec les acteurs pour présélectionner les scénarios à analyser, et mettre en forme les résultats pour pouvoir les analyser. Ce travail de mise en forme s'est notamment déroulé au travers du choix des graphiques à construire. Néanmoins, la présentation des premiers résultats pour chaque scénario soulevait généralement des questions de la part des acteurs, ainsi que des souhaits pour d'autres types d'analyses des données. De même, capitaliser l'information issue de l'évaluation des scénarios et identifier ce que les acteurs peuvent en tirer par rapport à leurs objectifs et actions, a nécessité d'intenses moments de réflexion partagée entre acteurs locaux et chercheurs, qui ont été vécus comme enrichissants.

Lors de la mise en œuvre de ces deux approches de modélisation avec les acteurs locaux, il semble nécessaire d'être à l'écoute des sensibilités et d'être prêts à s'adapter aux souhaits des acteurs. Par exemple, lors de l'organisation des séances de simulations interactive, nous cherchions à avoir une mixité de types³² d'agriculteurs. Or, dans les trois sessions qui ont finalement été organisées, la première comportait essentiellement des exploitants de type « riziculteur spécialisé », la seconde une diversité de types d'exploitations, et la troisième uniquement des éleveurs. Lorsque nous proposons à un agriculteur de participer à une séance, la première question portait souvent sur les autres participants, et les agriculteurs semblaient rassurés et plus motivés de participer à une réunion où ils connaissaient au moins une partie des agriculteurs présents. Finalement, les deux séances qui se sont le mieux déroulées en termes d'efficacité et qualité des discussions sont celles où tous les exploitants étaient à peu près du même type d'exploitation. La seconde séance impliquant des exploitants de types différents, qui ne se connaissaient *a priori* pas, a vu quelques tensions apparaître entre différents agriculteurs au discours parfois « militant ». De même pour l'évaluation des scénarios à l'aide du modèle bioéconomique, il a semblé nécessaire de travailler de manière individuelle avec chaque acteur. Les réunions collectives peuvent avoir le désavantage que les rapports de force entre les acteurs s'y expriment, et que dans ces conditions, les contributions de certains peuvent être limitées (Mathevet *et al.*, 2010). Après cette phase de travaux avec chaque acteur en parallèle, l'intérêt de réunions collectives pour ce type de travail a été exprimé par deux acteurs.

³² Sur la base de la typologie des exploitations agricoles présentée au chapitre 4.

2. Apports et limites de l'approche mise en œuvre pour les acteurs camarguais

La contribution majeure de cette thèse aux réflexions des agriculteurs et acteurs camarguais s'est faite via la construction, l'évaluation et les résultats des scénarios par rapport aux évolutions possibles de l'agriculture du territoire et à leurs impacts. Dans cette section de la discussion, nous revenons sur cet apport pour discuter ses intérêts et limites pour les acteurs camarguais, et concluons sur les poursuites à donner à ce travail en Camargue.

2.1. L'évaluation collective de scénarios

Des exercices de prospective ont déjà été conduits sur le territoire camarguais, plutôt en rapport à de grandes perturbations liées à des infrastructures (par exemple, doublement de l'autoroute reliant Nîmes à Marseille au niveau d'Arles, extension du port de Fos-sur-Mer, (Mouret, Com. Pers). Ces scénarios ne portaient pas sur les activités agricoles et n'avaient pas été évalués de manière quantitative.

Dans notre cas, l'évaluation des scénarios s'est accompagnée de la quantification des indicateurs pour des scénarios de référence, qui étaient, suivant les cas, la situation actuelle ou une situation dans un futur proche (post réforme de la PAC, 2014). Ceci a permis de comparer les scénarios évalués à ces situations de référence, et notamment de considérer des évolutions relatives des indicateurs plutôt que des valeurs absolues, ce qui semblait plus prudent étant donné les risques d'erreurs et de propagation de celles-ci à travers l'agrégation des résultats jusqu'à l'échelle du territoire. Des résultats ont été produits à deux échelles majeures : l'échelle de l'exploitation et l'échelle du territoire.

2.1.1. Echelle exploitation

L'analyse des scénarios a montré la dépendance des exploitations agricoles camarguaises aux prix de vente des produits et aux subventions. Cette dépendance est d'autant plus forte dans le cas des systèmes peu diversifiés, ce qui représente une majorité des exploitations de grandes cultures en Camargue. Face à la variabilité des conditions économiques et à l'incertitude sur l'avenir de la PAC, les exploitants avec qui nous avons travaillé étaient à la recherche de stratégies leur permettant de réduire leur dépendance aux conditions extérieures : ils cherchaient des pistes de systèmes plus stables et plus résilients (Lopez Ridaura, 2005a).

La simulation interactive du scénario de réforme de la PAC a permis d'identifier des stratégies d'adaptations possibles pour les exploitations camarguaises spécialisées dans la production de riz. Ces stratégies sont basées principalement sur (i) une diversification de l'exploitation, soit par l'ajout de nouvelles « grandes » cultures, soit par l'ajout de fourrages

dans l'assolement, et /ou (ii) vers la conversion partielle ou totale de l'exploitation à l'AB. La diversification des activités vers l'élevage n'a pas été considérée par les agriculteurs comme une solution possible, pointant le fait que cette activité présente beaucoup de contraintes que la plupart ne sont pas prêts à supporter. Dans le cas où des exploitations qui n'ont pas d'activité d'élevage intégreraient des fourrages dans l'assolement, ceux-ci seraient destinés à être vendus.

Cependant, ces stratégies d'adaptation n'avaient pas les mêmes impacts sur les performances des exploitations. Diversifier les cultures céréalières ne s'est jamais avéré, dans les simulations, aussi performant à terme que la conversion partielle de l'exploitation à l'AB et l'introduction de fourrages. Cependant, la conversion à l'AB implique une perte de performance économique pour l'exploitation durant la période de conversion, puisque i) les rendements de la plupart des cultures sont plus faibles, ii) les prix auxquels les productions sont vendues restent les mêmes durant la conversion et iii) les aides à la conversion ne balancent pas ces pertes.

Pour une majorité des exploitations types, le scénario de réforme de la PAC se traduit par une diminution de la marge brute et de la dépendance aux aides, ainsi que par une réduction de l'emploi des pesticides. La substitution de la culture du riz par des cultures sèches entraîne une réduction du temps de travail, et gomme une partie des pics de temps de travaux au printemps (travail du sol et semis du riz, voir chapitre 6), mais pourrait augmenter les temps de travaux à l'automne en cas d'augmentation de la part des cultures d'hiver dans l'assolement (travail du sol et semis du blé-dur).

La prolongation de l'analyse de scénarios portant sur la réforme de la PAC, demandée par les acteurs, a visé à identifier s'il existait un seuil d'aide couplée à la production rizicole qui permettrait de maintenir une culture du riz économiquement incitative, ce qui semblait être une condition nécessaire à la conservation à l'échelle de la région d'une filière économiquement viable. Les hypothèses de ce scénario concernant les stratégies possibles d'adaptation des exploitations (par exemple diversification, conversion à l'AB) et implémentées en termes de contraintes dans le modèle bioéconomique, ont été définies à partir des résultats obtenus avec le modèle multi-agents IMPASIAS. Cela a permis d'identifier qu'une aide couplée à un niveau de 150 €/ha¹ permettrait de maintenir la compétitivité du riz, dans les conditions de prix de 2009.

Les choix d'assolements des agriculteurs au cours des séances de simulation interactive ont presque systématiquement conduit à une réduction de l'emploi des pesticides à l'échelle de l'exploitation. Plus les exploitations produisaient initialement du riz, plus les changements d'assolement ont été importants et plus l'emploi des pesticides a été réduit, montrant ainsi qu'il existait des marges de manœuvre pour la réduction de ceux-ci, notamment via des changements d'assolements. La réflexion sur la réduction de l'emploi des pesticides a été poursuivie par une analyse avec le modèle bioéconomique pour pouvoir borner ces marges de manœuvre, et notamment identifier le coût, en termes de perte de marge brute, de différents niveaux de réduction des pesticides. D'autres pistes pour la réduction de l'emploi des produits phytosanitaires ont été évaluées, telles que la simplification des itinéraires techniques ou la conversion d'une partie ou de toute l'exploitation en AB. Ceci a permis de montrer qu'il était possible de réduire fortement la quantité de pesticides utilisés, et que la réduction de marge brute des exploitations pourrait ne pas être aussi importante que les acteurs le pressentaient. Cependant, toutes les exploitations, en fonction de leur usage du sol actuel et de leurs ressources (notamment en termes de type de sol) n'ont pas les mêmes marges de manœuvre pour réduire l'usage de ces produits.

L'évaluation du scénario relatif à la réforme de la PAC avec les agriculteurs a soulevé à plusieurs reprises la question de la conversion à l'AB. Au-delà de la période de transition où les performances économiques sont réduites, cette stratégie pourrait, en fonction du type d'exploitation, s'avérer avantageuse tant qu'une différence de prix conséquente est maintenue entre les productions conventionnelles et biologiques. Les subventions pour la conversion à l'AB permettent d'absorber une partie de la perte économique occasionnée par la période de conversion, cependant, elles ne sont pas suffisantes (toujours dans les conditions de prix de 2009) pour contrebalancer totalement la perte de rentabilité. Toutes les exploitations ne sont pas égales face à la conversion à l'AB. En effet, les proportions de types de sol ont un impact conséquent sur le potentiel de développement de l'AB dans une exploitation. Celles qui ont beaucoup de terres basses n'ont notamment pas intérêt à convertir ces terrains, étant donné le besoin de les dessaler qui implique d'y cultiver fréquemment du riz, ce qui est impossible en AB où la pression de mauvaises herbes nécessite des rotations longues. Les exploitations pratiquant l'élevage peuvent utiliser ces sols comme prairies salées (sansouires). Pour les autres, cela signifierait leur abandon quasi obligatoire, ou des stratégies de rotations avec jachère inondée, la difficulté étant alors de supporter le coût de l'eau. Ceci pourrait être

imaginé pour des systèmes où une autre activité telle que la chasse pourrait rentabiliser la mise en eau.

La principale limite technique actuelle à la conversion à l'AB semble être les mauvaises performances économiques des cultures qui viennent en rotation après le riz, et notamment le blé-dur, le riz étant limité à environ une culture tous les cinq ans du fait de la pression de mauvaises herbes.

2.1.2. Echelle territoriale

Les SPA camarguais n'ont pas subi de modification majeure au cours des dix dernières années en terme d'usage du sol, le contexte économique lié aux subventions de l'Union Européenne ayant été plutôt favorable à la culture du riz, qui est donc restée la culture pivot de la Camargue. Cependant, au début des années 1980, cette culture n'était présente que sur de faibles surfaces, essentiellement du fait de très faibles prix, et comme mentionné auparavant, des problèmes de salinité des sols étaient apparus. Aujourd'hui, la réforme de la PAC est perçue comme une menace pour l'avenir de la filière rizicole, pour la qualité des sols vis à vis du sel, ainsi que pour le maintien des synergies entre agriculture et nature en Camargue.

La suppression de l'aide couplée à la production de riz risque de diminuer fortement la surface cultivée en riz à l'échelle de la région, au bénéfice de cultures sèches comme le sorgho, le maïs ou le colza (sur les terres hautes) compétitives par rapport au riz au plan économique, du moins en agriculture conventionnelle. Le choix de cultiver l'une ou l'autre de ces cultures par un exploitant dépend cependant de son expérience, de son niveau d'équipement, de son savoir-faire, et des débouchés et prix auxquels il pense pouvoir vendre sa production. La réduction de la surface en riz pourrait donc être progressive, les agriculteurs testant différentes cultures alternatives sur une petite surface avant de décider vers quelles cultures se diversifier.

Un consensus a été atteint entre tous les acteurs engagés sur la nécessité de conserver une surface en riz importante en Camargue, pour s'assurer que les systèmes d'irrigation soient maintenus, et que les entreprises locales en lien avec l'agriculture, qui fournissent un nombre d'emplois conséquent à la région, continuent à fonctionner normalement. Cette prise de position relance cependant le débat du choix de financer l'agriculture via des aides publiques, celle-ci prenant quasiment exclusivement en charge les coûts de fonctionnement des systèmes d'irrigation et de drainage dont bénéficient les espaces naturels. Calvet et al. (2011) se sont

posés la question de ce que coûte à la société l'agriculture et le maintien des espaces naturels en Camargue en terme de subventions publiques, afin de pouvoir contribuer au débat sur la nécessité du maintien de l'agriculture dans ce territoire pour le fonctionnement des espaces naturels (plutôt que de financer l'apport d'eau douce du Rhône directement vers les espaces naturels). Cependant, le rôle de l'agriculture en Camargue va au-delà de sa contribution au fonctionnement des espaces naturels. Ce débat devrait également être conduit à une échelle supérieure à la Camargue, en prenant en compte les enjeux territoriaux des régions Provence-Alpes-Côte-D'azur et Languedoc-Roussillon, voir des objectifs nationaux de fonctionnement des territoires ruraux.

Il est cependant évident que ce maintien du riz doit s'accompagner d'une réduction de l'usage des produits phytosanitaires et l'augmentation de la part d'AB à l'échelle de la région est une voie effective pour y parvenir. L'évaluation de ces objectifs à l'aide de scénarios à l'échelle de la région, a montré qu'ils étaient atteignables. Il convient cependant maintenant de travailler davantage avec les agriculteurs pour identifier les pistes d'évolution des systèmes à leurs échelles et les leviers possibles pour favoriser ces changements. Pour supporter les agriculteurs dans des stratégies de réduction des pesticides, des MAE pourraient être mises en place, avec par exemple, comme contraintes la mise en place de rotations diversifiées, ou même des limites en terme de pesticides utilisés par culture. Ce travail a également montré qu'il serait plus efficace de diriger ces MAE vers les exploitations qui consomment le plus de pesticides à l'échelle de la région, c'est à dire celles qui produisent beaucoup de riz. Cependant, il conviendrait d'évaluer *ex-ante* ce type de mesure pour vérifier qu'elle aurait les effets escomptés, et *a fortiori* pas d'effets négatifs, ce qui pourrait être réalisé à l'aide de la démarche que nous avons proposée.

Une collaboration plus importante entre les systèmes céréaliers et d'élevage pourrait également contribuer à ces objectifs, notamment via l'introduction de cultures fourragères (comme la luzerne), à destination des exploitations d'élevage, et comme tête de rotation dans les exploitations céréalières. Ce type d'arrangement entre exploitants est déjà présent dans quelques cas isolés, et semble être une alternative intéressante en termes économiques et agronomiques. Son application à l'échelle du territoire est cependant conditionnée au développement d'un élevage rentable.

L'évaluation de ces scénarios avec les acteurs a permis de formaliser les connaissances sur les contraintes spécifiques à certains types de sol (Mailly, 2011). Ainsi, cette étude a montré

qu'en cas d'une conversion totale de la région à l'AB, toutes les terres basses présentant des problèmes de salinité aiguë (représentant 19 % des sols camarguais), seraient difficilement mises en valeur par des activités céréalières. En effet, le besoin de cultiver fréquemment du riz pour dessaler est incompatible avec la gestion de la pression des mauvaises herbes, qui nécessite d'allonger les rotations avec des cultures sèches. Pour maintenir les sols camarguais propres à la culture, il semble donc nécessaire, d'après nos estimations, de conserver une surface minimum en riz comprise entre 4700 et 7100 ha en Camargue (Mailly *et al.*, Submitted) en comparaison aux 21 000 ha actuels, ou à l'inverse, aux 3 800 ha de 1984, où des problèmes de salinisation excessive étaient apparus (Mouret, 1988). Cependant, ces surfaces minimales en riz devraient être localisées sur les terres les plus sensibles au sel. Des approches permettant d'étudier la spatialisation des cultures dans un territoire pourraient permettre d'approfondir cette question (Clavel, 2010).

Le développement des systèmes en AB semble être aujourd'hui contraint par les collecteurs qui ne souhaitent pas que ces systèmes se développent trop rapidement, notamment pour pouvoir conserver un rapport entre offre et demande permettant de maintenir un écart important de prix entre production conventionnelle et biologique. Cependant, un développement important de l'AB entrainerait des mutations importantes dans les activités des acteurs de ces filières, avec des besoins importants d'intrants certifiés (notamment des fertilisants et semences), et une diminution des volumes produits à l'échelle du territoire qui impacterait négativement les activités de collecte et transformation (Lopez Ridaura *et al.*, Submitted).

Les agriculteurs souhaitant se convertir à l'AB sont aujourd'hui peu accompagnés, du fait du manque de conseil spécialisé à ce sujet. Certains agriculteurs parmi ceux avec qui nous avons travaillé souhaitaient essayer l'AB sur une partie de leur exploitation. Il semble donc probable qu'un nombre important d'agriculteurs en Camargue soient tentés par cette alternative. Les réflexions qu'ils ont pu avoir au cours des séances de simulation interactive ont montré que ce type d'outil pourrait participer à l'activité de conseil. Le SRFF, dans ce sens, a un rôle à jouer pour proposer à davantage d'agriculteurs l'accès à ce type d'informations et réflexions.

2.2. Poursuite des activités en Camargue

La démarche générale présentée dans le chapitre 1 (figure 1.4) a été conduite dans son intégralité au cours de cette thèse. Les résultats obtenus invitent à conduire une seconde boucle de cette démarche.

Pour la phase 1, il est nécessaire de réengager un acteur essentiel, le SRFF, du fait du renouvellement récent de l'équipe de direction. Aucun membre de cette nouvelle équipe n'ayant suivi l'intégralité de la démarche, ils ne sont donc pas au courant des choix faits à chaque étape et des résultats obtenus. La caractérisation des systèmes du territoire, comme mentionnée précédemment, devra être davantage négociée. Les données sur les activités agricoles doivent être mises à jour, et certaines activités pourraient être ajoutées (par exemple le pois et la féverole ainsi que les cultures associées, pour lesquels des données sont dorénavant disponibles, ou des systèmes agroforestiers qui permettraient notamment de baisser le niveau de la nappe salée et de fragmenter le paysage). Enfin, les modèles devront être améliorés, par la simulation du bilan hydrique détaillé pour le modèle IMPASIAS à l'échelle de l'ASA de Fumemorte, et par une meilleure simulation de l'impact de la variabilité des prix sur les scénarios pour le modèle bioéconomique. En effet, une analyse plus systématique pourrait être réalisée via le développement d'une analyse de sensibilité du modèle de type Monte-Carlo (Melià *et al.*, 2005).

Enfin, la mise en œuvre de la démarche en Camargue s'est essentiellement réalisée de manière individuelle avec les acteurs locaux, notamment du fait des rapports de force existants entre ceux-ci qu'il convient de gérer dans une démarche collective. Une piste pour la poursuite de ce travail pourrait être de mettre en place un comité de pilotage du projet incluant des chercheurs et des partenaires de terrains. Les rapports de force s'exprimeraient durant ces comités de pilotage et non durant des séances d'évaluation de scénarios, ce qui permettrait de réaliser ces évaluations collectivement.

Il serait également profitable d'élargir les compétences et disciplines présentes dans le projet. En particulier, des compétences en facilitation de groupe permettraient de s'assurer d'une animation de qualité supérieure pour les temps collectifs. Des compétences en sociologie permettraient la réalisation d'une évaluation plus qualitative de l'impact des scénarios sur des indicateurs sociaux. Enfin des compétences en économie des marchés et politiques publiques, ainsi qu'en gestion et finance des entreprises agricoles, pourraient changer la nature des scénarios et enrichir les interactions avec les acteurs.

Le nombre d'acteurs et d'agriculteurs touchés par ce type de projet est finalement assez restreint. Dans notre cas, 14 agriculteurs ont participé à l'évaluation de scénarios, et cinq acteurs locaux (le SRFF, le Parc Naturel Régional de Camargue, le Syndicat Mixte de la Camargue Gardoise, ainsi que deux collecteurs de céréales) ont soit été engagés dans la démarche d'évaluation de scénarios, soit ont eu accès à une restitution des résultats des scénarios, avec discussion des impacts possibles des scénarios sur leurs activités. Il semble important, pour élargir le public touché par ce type d'approche, de se donner les moyens de multiplier les séances d'évaluation de scénarios, ou d'organiser des restitutions à un panel d'acteurs plus large. Les organiser avec les acteurs locaux engagés dans le projet permettrait probablement de fédérer le maximum d'acteurs. Pour la Camargue, le SRFF semble être à ce niveau l'acteur incontournable sur lequel il faut s'appuyer pour la mise en place et l'organisation des restitutions.

Ces évaluations de scénarios n'ont pas donné lieu, pour l'instant et à notre connaissance, à des actions concrètes en lien avec les résultats obtenus. Ce projet doit être poursuivi, à la fois pour approfondir l'évaluation des scénarios de manière collective, ainsi que pour évaluer les effets de la démarche. Pour l'organisation de séances collectives incluant agriculteurs et acteurs, il est nécessaire que tous aient un rôle à jouer, ce qui nécessite soit un modèle qui donne une réelle place à chaque acteur, soit un modèle par acteur. La complémentarité que nous avons montrée entre une approche basée sur la décision d'usage du sol qui donne des résultats en terme d'impact (basée sur un modèle multi-agents) et une approche basée sur l'optimisation de l'usage du sol pour des objectifs différents (basée sur un modèle bioéconomique), pourrait être testée avec des acteurs et de manière collective. Des sessions collectives ayant pour but de tester cette complémentarité seront réalisées en 2012 dans le cadre de la poursuite de ce projet d'évaluation de scénarios, avec un financement de FranceAgriMer.

3. Conclusion : apports et limites de l'approche PIMPAAS

Cette dernière partie analyse les intérêts et limites de l'approche globale développée dans cette thèse (cf. Figure 1.6 p.32) au regard des quatre critères proposés au chapitre 1 et 2, à savoir la Participation des acteurs, le besoin d'une approche Intégrée et Multi-échelles, et Prospective pour l'évaluation des systèmes agricoles (PIMPAAS).

3.1. Participation des acteurs locaux

En prolongement de la section 1 de ce chapitre, nous analysons ici trois éléments majeurs de la posture adoptée pour travailler avec les agriculteurs et acteurs locaux du territoire.

Premièrement, un projet de recherche participative doit être conduit comme un processus adaptatif. L'équipe de chercheurs engagés dans le projet doit s'adapter aux acteurs pour prendre en compte leurs objectifs, identifier et partager les objectifs qui sont éventuellement en conflit et s'assurer que l'action de recherche entreprise ne va pas à l'encontre de l'intérêt d'un des acteurs. Cette adaptabilité peut s'exprimer dans les différentes phases d'un projet : depuis l'offre de participer, à travers l'engagement progressif des acteurs, jusqu'à la collaboration avec eux pour l'analyse de données, l'organisation de réunions voire la rédaction d'un article. Cela nécessite également d'adapter le calendrier à la disponibilité des agriculteurs et des acteurs locaux, d'être force de proposition et d'animation, et d'accepter de travailler sur des problématiques qui ne sont pas directement liées au projet si elles sont dans l'intérêt des acteurs. La contrainte pour l'équipe de recherche peut être une dispersion, au moins temporaire, par rapport à ses thématiques scientifiques prioritaires (notamment si elles sont liées à un type de culture ou de processus) et un accroissement du temps investi sur le terrain et en réunions, déjà considérable dans le cadre de notre projet.

Deuxièmement, ce processus doit être conduit de manière transparente aussi bien de la part des chercheurs que de la part des acteurs. La position adoptée par les chercheurs vis-à-vis du terrain camarguais et des acteurs est une position de neutralité. Via l'exposition des objectifs méthodologiques, et l'absence d'objectifs appliqués, ainsi que via l'explicitation auprès de chaque acteur de l'ensemble des actions entreprises avec les autres acteurs, une attention particulière a été portée à ce que les objectifs et actions soient transparents pour les acteurs. Il était attendu en retour que ceux-ci adoptent la même posture. Ainsi, même si des acteurs étaient potentiellement en conflits, le fait que chacun connaisse l'ensemble des objectifs et activités des autres a permis d'aller au bout du travail entrepris sans que les rapports de force ou craintes sur les résultats ne freinent l'engagement des acteurs.

Troisièmement, il semble important de réfléchir l'implication des acteurs dans le projet, au-delà de la phase d'engagement initiale, c'est-à-dire dans les étapes où ils trouveront le plus d'intérêt ou celles où ils pourront apporter le plus. Ainsi, tous les acteurs n'ont pas été impliqués aux mêmes étapes : le SRFF, qui avait des données et était un acteur important pour la légitimation de celles-ci, a été beaucoup impliqué dans les phases de collecte, formalisation et analyse des données, alors que le PNRC par exemple, et a été plus impliqué dans la phase d'évaluation des scénarios. La première évaluation de scénario qui a été réalisée dans ce projet, est celle rapportée dans le chapitre 6. Le fait d'engager des agriculteurs, à travers l'organisation des sessions de simulation interactive, et le fait que leurs retours soient positifs, a contribué à légitimer à la fois les données, et le projet en général, auprès des autres acteurs locaux. Ceci montre bien que tous les acteurs n'ont pas le même statut et qu'en particulier les agriculteurs sont des acteurs essentiels qu'il est nécessaire d'impliquer fortement dès le départ.

3.2. Intégration de connaissances et prise en compte d'objectifs multiples

Les méthodes mises en œuvre dans cette thèse, de par les multiples sources de données utilisées (cf. chapitres 3, 4 et 5), et de par les nombreux indicateurs calculés, se situent bien dans la continuité de l'évaluation intégrée des systèmes agricoles (IAAS) (Parker *et al.*, 2002; Bezlepkina *et al.*, 2011). La définition des critères et indicateurs pour une évaluation intégrée avec les acteurs locaux du territoire, telle que rapportée dans le chapitre 3, est une approche originale qui a fait l'objet de peu de travaux (Fraser *et al.*, 2006). Le choix de considérer une fonction « objectif » et de multiples contraintes plutôt qu'une fonction d'utilité dans le modèle bioéconomique, permet de définir des objectifs dans différentes unités (par exemple €, litre, kilogramme) et pouvant prendre différentes valeurs, ce qui semble essentiel pour pouvoir fixer des contraintes à partir d'indicateurs transparents pour les acteurs.

Dans les deux outils d'évaluation de scénarios utilisés, les différents critères n'ont pas été pondérés. A aucun moment, le besoin d'agrèger les indicateurs en indices de durabilité ne s'est fait sentir, et les acteurs semblent avoir apprécié de pouvoir comparer les scénarios sur la base de différents critères, chacun s'intéressant aux indicateurs les plus importants par rapport à ses objectifs.

Une des limites de la démarche mise en œuvre au regard de l'aspect intégré est que peu d'indicateurs sociaux ont pu être considérés pour évaluer les scénarios, ce qui est classique dans les approches d'IAAS (van Ittersum *et al.*, 2008). Il serait certainement pertinent pour les

acteurs de réaliser des évaluations des scénarios, peut-être plus qualitatives, et post simulations au regard de ce type d'indicateurs. Les résultats fournis au cours d'une séance de simulation interactive par le modèle multi-agents pourraient servir de base à la discussion des conséquences du scénario étudié sur des aspects sociaux, comme par exemple en termes d'organisation du travail, de qualité de vie ou de reconnaissance sociale. Cette piste doit encore être explorée.

3.3. Prise en compte d'échelles multiples

Plusieurs échelles pertinentes pour l'évaluation des scénarios ont été identifiées et mobilisées. L'échelle de la parcelle, nécessaire pour une description précise des activités agricoles, a été complétée par la description de l'échelle de l'exploitation, où se prennent les décisions, ainsi que par l'échelle des sous-régions et du territoire, où s'observent certains impacts de l'agriculture et où se gèrent certaines ressources, notamment pour les filières de transformation des productions agricoles ainsi que pour l'eau et l'environnement.

La procédure de changement d'échelle que nous avons utilisée est simple, basée sur la pondération par la surface ou le nombre à l'aide de typologies. Elle pourrait être améliorée par la simulation de chaque exploitation du territoire, et par la prise en compte de phénomènes de voisinage, non-linéaires, tels que des échanges de matières ou de terres entre exploitations agricoles, des phénomènes d'économie d'échelle, ou des processus dont la quantification dépend des choix de l'ensemble des exploitations d'une sous-région. Par exemple, nous avons implémenté dans le modèle multi-agents des équations permettant de simuler un bilan hydrique détaillé pour l'ASA de Fumemorte. Celles-ci permettent, à partir de la surface totale cultivée en riz au sein d'un périmètre d'irrigation, de déterminer le volume d'eau consommé par hectare. Il est donc nécessaire de connaître les surfaces cultivées en riz de toutes les exploitations du périmètre considéré pour pouvoir calculer le volume d'eau consommé pour un hectare de riz sur ce périmètre. C'est un exemple de processus où des propriétés émergentes du système peuvent être mises en évidence, et qui pourrait améliorer les propriétés multi-échelles de l'approche.

Enfin, la combinaison dans une même démarche d'approches d'évaluation de scénarios statiques (à partir de la modélisation bioéconomique) et dynamiques (à partir de la modélisation multi-agent), a permis d'aborder la question du futur de l'agriculture sous deux angles différents et complémentaires : (i) l'identification et l'évaluation de situations, à l'équilibre, souhaitables pour l'avenir et compromis entre les objectifs des différents acteurs et

(ii) l'évaluation de différentes voies d'évolution possibles des systèmes agricoles. L'aspect multi-échelles quant à la temporalité de l'étude est en lien étroit avec son caractère prospectif, il est donc discuté dans le point suivant.

3.4. Propriétés pour une étude prospective

La capacité prospective d'une étude peut s'évaluer au regard de sa capacité à soulever des questions et à contribuer à y répondre quant aux évolutions possibles d'un système donné. Les études dites « prédictives » sont souvent à des horizons de temps courts (par exemple, l'année prochaine) et à des échelles spatiales plus fines (l'exploitation agricole), alors que des études à des échelles plus grandes peuvent être à des horizons de temps beaucoup plus longs (50 ans, par exemple dans AgriMonde 2050 (Chaumet *et al.*, 2009; Hubert *et al.*, 2010)). La définition des scénarios avec les acteurs a conduit à faire le choix de travailler sur un horizon de temps relativement proche, de 5 à 10 ans, qualifiable d'intermédiaire (moyen terme). C'est cet horizon de temps qui semblait le plus pertinent pour les acteurs, du point de vue du réalisme et de l'utilité des scénarios pour eux. Un horizon de temps plus long nécessiterait de considérer les évolutions des autres activités économiques du territoire, ce qui conduit généralement à des études prospectives plus qualitatives. Il donne par ailleurs beaucoup de poids aux hypothèses faites sur les coefficients techniques (considérés comme indépendants de l'année dans cette étude) et sur les évolutions externes au système étudié non prises en compte dans les paramètres des scénarios (climat, inflation, progrès génétique...).

Le choix de cet horizon de temps n'est en effet pas anodin, il a eu beaucoup d'implications à la fois sur les données à acquérir ainsi que sur les scénarios à évaluer et sur la définition des scénarios de référence pour la comparaison. Sur un horizon de temps de 5 à 10 ans, il est possible de faire l'hypothèse que les itinéraires techniques des agriculteurs, décrits à partir de leurs pratiques actuelles, n'auront pas fondamentalement changé. De même, les contraintes agronomiques à la mise en valeur des terres en Camargue identifiées et implémentées dans le modèle bioéconomique, n'auront pas été levées. Il est donc nécessaire, pour cet horizon de temps intermédiaire que les données et modèles soient réalistes par rapport à la représentation de la situation actuelle. Cependant ce réalisme peut limiter le pouvoir prospectif des scénarios : les contraintes que nous avons implémentées et les données que nous avons utilisées empêchent de penser une mise en valeur de la Camargue complètement différente de l'actuelle. Il y a donc un compromis fort entre l'horizon de temps choisi et le pouvoir exploratoire et prospectif de l'approche.

Références

- Abdelkrim, N., 2011. Variabilité des rendements en blé dur : les simulations du modèle STICS confrontées à l'expertise. Rapport de Stage, Master CESPAs - SupAgro Montpellier.
- Acs, S., Berentsen, P.B.M., Huirne, R.B.M., 2007. Conversion to organic arable farming in The Netherlands: A dynamic linear programming analysis. *Agricultural Systems* 94, 405-415.
- Aguilar-Portero, M., 2004. Pesticides application reduction in integrated rice production in Southern Spain. In: Ferrero, A., Vidotto, F. (Eds.), *Challenges and Opportunities for Sustainable Rice-Based production systems*. Edizioni Mercurio, Torino, Italy, 13-15 September. 6p.
- Andersen, E., Elbersen, B., Godeschalk, F., Verhoog, D., 2007. Farm management indicators and farm typologies as a basis for assessments in a changing policy environment. *Journal of Environmental Management* 82, 353-362.
- Angevin, F., Klein, E.K., Choimet, C., Gauffreteau, A., Lavigne, C., Messéan, A., Meynard, J.M., 2008. Modelling impacts of cropping systems and climate on maize cross-pollination in agricultural landscapes: The MAPOD model. *European Journal of Agronomy* 28, 471-484.
- Anonymous, 2005. Directorate General for Agriculture and Rural Development, Unit G-4 - Evaluation of Measures applied to Agriculture Studies. Agri-environment Measures. Overview on General Principles, Types of Measures, and Application. European Commission. p. 24.
- Antona, M., D'Aquino, P., Aubert, S., Barreteau, O., Boissau, S., Bousquet, F., Daré, W., Etienne, M., Le Page, C., Mathevet, R., Trébuil, G., Weber, J., Commod, C., 2005. La modélisation comme outil d'accompagnement. *Natures Sciences Sociétés* 13, 165-168.
- Aviron, S., Jeanneret, P., Schüpbach, B., Herzog, F., 2007. Effects of agri-environmental measures, site and landscape conditions on butterfly diversity of Swiss grassland. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 122, 295-304.
- Bakker, M.M., van Doorn, A.M., 2009. Farmer-specific relationships between land use change and landscape factors: Introducing agents in empirical land use modelling. *Land Use Policy* 26, 809-817.
- Balana, B.B., Vinten, A., Slee, B., 2011. A review on cost-effectiveness analysis of agri-environmental measures related to the EU WFD: Key issues, methods, and applications. *Ecological Economics* 70, 1021-1031.
- Bamière, L., Havlík, P., Jacquet, F., Lherm, M., Millet, G., Bretagnolle, V., 2011. Farming system modelling for agri-environmental policy design: The case of a spatially non-aggregated allocation of conservation measures. *Ecological Economics* 70, 891-899.
- Barbier, J.M., Conesa, A.P., Mouret, J.C., Bouchier, A., 1986. Bilan de deux années d'études de l'agrosystème rizicole en Camargue., Rapport ONIC-LECSA.
- Barbier, J.M., Lopez-Ridaura, S., 2010. Evaluation de la durabilité des systèmes de production agricoles : limites des démarches normatives et voies d'amélioration possibles. In: Coudel, E., Devautour, H., Soulard, C. (Eds.), *ISDA 2010 (Innovation and sustainable development in Agriculture and Food)*, Montpellier, France, 28/06-01/07/2010.
- Barbier, J.M., Mouret, J.C., 2000. Reconsidérer les formes d'appui aux agriculteurs. Pour une agronomie de l'exploitation agricole. *FaçSADe* 5, 4p.
- Barnaud, C., Bousquet, F., Trebuil, G., 2008. Multi-agent simulations to explore rules for rural credit in a highland farming community of Northern Thailand. *Ecological Economics* 66, 615-627.

- Bathfield, B., Gasselin, P., S., L.-R., Vandame, R., Submitted. A flexibility framework to understand agronomic changes in the adaptation of small coffee producers facing market shocks. *World Development*.
- Becker, M., Johnson, D.E., 1999. Rice yield and productivity gaps in irrigated systems of the forest zone of Côte d'Ivoire. *Field Crops Research* 60, 201-208.
- Becu, N., Neef, A., Schreinemachers, P., Sangkapitux, C., 2008. Participatory computer simulation to support collective decision-making: Potential and limits of stakeholder involvement. *Land Use Policy* 25, 498-509.
- Becu, N., Perez, P., Walker, A., Barreteau, O., Page, C.L., 2003. Agent based simulation of a small catchment water management in northern Thailand: Description of the CATCHSCAPE model. *Ecological Modelling* 170, 319-331.
- Belhouchette, H., Louhichi, K., Therond, O., Mouratiadou, I., Wery, J., Ittersum, M.v., Flichman, G., 2011. Assessing the impact of the Nitrate Directive on farming systems using a bio-economic modelling chain. *Agricultural Systems* 104, 135-145.
- Belhouchette, H., Louhichi, K., Therond, O., Mouratiadou, I., Wery, J., Van Ittersum, M.K., Flichman, G., 2010. Assessing farm responses to environmental and socio-economic changes: the use of a bio-economic modeling chain. *Submitted to Agricultural Systems*.
- Bell, S., Morse, S., 1999. Sustainability Indicators: Measuring the Immeasurable. Earthscan, London (1999).
- Berger, T., 2001. Agent-based spatial models applied to agriculture: a simulation tool for technology diffusion, resource use changes and policy analysis. *Agricultural Economics* 25, 245-260.
- Berger, T., Schreinemachers, P., Woelcke, J., 2006. Multi-agent simulation for the targeting of development policies in less-favored areas. *Agricultural Systems* 88, 28-43.
- Bernet, T., Ortiz, O., Estrada, R.D., Quiroz, R., Swinton, S.M., 2001. Tailoring agricultural extension to different production contexts: a user-friendly farm-household model to improve decision-making for participatory research. *Agricultural Systems* 69, 183-198.
- Bezlepina, I., Reidsma, P., Sieber, S., Helming, K., 2011. Integrated assessment of sustainability of agricultural systems and land use: Methods, tools and applications. *Agricultural Systems* 104, 105-109.
- Biggs, R., Raudsepp-Hearne, C., Atkinson-Palombo, C., Bohensky, E., Boyd, E., Cundill, G., Fox, H., Ingram, S., Kok, K., Spehar, S., Tengo, M., Timmer, D., Zurek, M., 2007. Linking futures across scales: a dialog on multiscale scenarios. *Ecology and Society* 12.
- Blazy, J.-M., Dorel, M., Salmon, F., Ozier-Lafontaine, H., Wery, J., Tixier, P., 2009a. Model-based assessment of technological innovation in banana cropping systems contextualized by farm types in Guadeloupe. *European Journal of Agronomy* 31, 10-19.
- Blazy, J.-M., Ozier-Lafontaine, H., Doré, T., Thomas, A., Wery, J., 2009b. A methodological framework that accounts for farm diversity in the prototyping of crop management systems. Application to banana-based systems in Guadeloupe. *Agricultural Systems* 101, 30-41.
- Bockstaller, C., Girardin, P., 2007. Mode de calcul des indicateurs agri-environnementaux de la méthode INDIGO. *INPL, ENSAIA, INRA, ARAA*.
- Bockstaller, C., Girardin, P., Van der Werf, H.M.G., 1997. Use of agro-ecological indicators for the evaluation of farmings systems. *Europ. J. Agronomy* 7, 261-270.
- Bockstaller, C., Guichard, L., Makowski, D., Aveline, A., Girardin, P., Plantureux, S., 2008. Agri-environmental indicators to assess cropping and farming systems. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 139-149.
- Boling, A., Tuong, T.P., Jatmiko, S.Y., Burac, M.A., 2004. Yield constraints of rainfed lowland rice in Central Java, Indonesia. *Field Crops Research* 90, 351-360.

- Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., Ekvall, T., Finnveden, G., 2006. Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures* 38, 723-739.
- Bouma, J., 2002. Land quality indicators of sustainable land management across scales. *Agric.Ecosystems and Environment* 88, 129-136.
- Bousquet, F., Bakam, I., Proton, H., Le Page, C., 1998. Cormas: common-pool resources and multi-agent Systems. *Lecture Notes in Artificial Intelligence* 1416, 826-838.
- Bousquet, F., Castella, J.-C., Trébuil, G., Barnaud, C., Boissau, S., Kam, S.P., 2007a. Using multi-agent systems in a companion modelling approach for agroecosystem management in South-east Asia. *Outlook on Agriculture* 36, 57-62.
- Bousquet, F., Castella, J.C., Trebuil, G., Barnaud, C., Boissau, S., Kam, S.P., 2007b. Using multi-agent systems in a companion modelling approach for agro-ecosystem management in South-east Asia. *Outlook on Agriculture* 36, 57-62.
- Bousquet, F., Le Page, C., 2004. Multi-agent simulations and ecosystem management: a review. *Ecological Modelling* 176, 313-332.
- Bousset, J.-P., Macombe, C., Taverne, M., 2005. Participatory methods, guidelines and good practice guidance to be applied throughout the project to enhance problem definition, co-learning, synthesis and dissemination. *SEAMLESS report no. 10*, 248p.
- Caillault, S., Mialhe, F., Vannier, C., Delmotte, S., Kedowide, C., Amblard, F., Etienne, M., Becu, N., Gautreau, P., Houet, T., Submitted. Nonlinear cumulative influence of incentive networks on landscape changes: A simple agent-based simulation approach. *Submitted to Environmental Modelling and Softwares*
- Calvet, C., Lifran, R., Mathevet, R., 2011. Combien coûte la Camargue ? Evaluation ex post des politiques publiques. Fondation MAVA, CNRS-CEFE et INRA LAMETA, Montpellier, p. 103.
- Casagrande, M., David, C., Valantin-Morison, M., Makowski, D., Jeuffroy, M.-H.l.n., 2009. Factors limiting the grain protein content of organic winter wheat in south-eastern France: a mixed-model approach. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 565-574.
- Casanova, D., Goudriaan, J., Bouma, J., Epema, G.F., 1999. Yield gap analysis in relation to soil properties in direct-seeded flooded rice. *Geoderma* 91, 191-216.
- Castella, J.-C., 2009. Assessing the role of learning devices and geovisualisation tools for collective action in natural resource management: Experiences from Vietnam. *Journal of Environmental Management* 90, 1313-1319.
- Castella, J.-C., Pheng Kam, S., Dinh Quang, D., Verburg, P.H., Thai Hoanh, C., 2007a. Combining top-down and bottom-up modelling approaches of land use/cover change to support public policies: Application to sustainable management of natural resources in northern Vietnam. *Land Use Policy* 24, 531-545.
- Castella, J.-C., Verburg, P.H., 2007b. Combination of process-oriented and pattern-oriented models of land-use change in a mountain area of Vietnam. *Ecological Modelling* 202, 410-420.
- Castella, J.C., Kam, S.P., Quang, D.D., Verburg, P.H., Hoanh, C.T., 2004. Combining top-down and, bottom-up modelling approaches of land use/cover change to support public policies: Application to sustainable management of natural resources in northern Vietnam. International Workshop on Integrated Assessment of the Land Use in Europe - Future of the Land, Amsterdam, NETHERLANDS, pp. 531-545.
- Castella, J.C., Ngoc Trung, T., Boisseau, S., 2005. Participatory Simulation of Land-Use Changes in the Northern Mountains of Vietnam: the Combined Use of an Agent-Based Model, a Role-Playing Game, and a Geographical Information System. *Ecology and Society* 10, 27.

- Castoldi, N., Bechini, L., 2010. Integrated sustainability assessment of cropping systems with agro-ecological and economic indicators in northern Italy. *European Journal of Agronomy* 32, 59-72.
- Chambers, R., Pacey, A., Thrupp, L.A. (Eds.), 1989. Farmer first: farmer innovation and agricultural research. Intermediate Technology Publications Ltd., London (UK). 218p.
- Chatelier, v., Guyomard, H., 2010. Le bilan de santé de la PAC et le rééquilibrage des soutiens à l'agriculture française. Working paper SMART - LERECO N°10-10, p. 31.
- Chaumet, J.-M., Delpeuch, F., Dorin, B., Ghersi, G., Hubert, B., Le Cotty, T., Paillard, S., Petit, M., Rastoin, J.-L., Ronzon, T., Treyer, S., 2009. Agrimonde, Agricultures et alimentations du monde en 2050 : Scénarios et défis pour un développement durable. INRA, CIRAD, p. 205.
- 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., A., S., Heurteaux, V., Berceaux, A., 2001. Satellite remote sensing and GIS used to quantify water input for rice cultivation (Rhône delta, France). In: Final Proceedings Conference on Remote Sensing and Hydrology held at Santa Fe, N.M., USA, April 2000. International Association of Hydrological Sciences Publ. No 267, pp. 446-450. (Ed.).
- Chauvelon, P., Sandoz, A., Pichaud, M., 2005. Impact de la gestion de l'eau et des inondations sur les bilans de sels et de sédiments dans l'hydrosystème central du delta du Rhône., WATMED 2 - Marrakech 14-17 November 2005, p. 9.
- Chauvelon, P., Tournoud, M.G., Sandoz, A., 2003. Integrated hydrological modelling of a managed coastal Mediterranean wetland (Rhône delta, France): initial calibration. *Hydrology and Earth System Sciences* 7, 123-131.
- Cittadini, E.D., Lubbers, M.T.M.H., de Ridder, N., van Keulen, H., Claassen, G.D.H., 2008. Exploring options for farm-level strategic and tactical decision-making in fruit production systems of South Patagonia, Argentina. *Agricultural Systems* 98, 189-198.
- Clavel, L., 2010. Développement d'une méthode de construction et d'évaluation de scénarios d'usages du sol de grands territoires. Application à la demande en eau d'irrigation dans le système Neste L'Institut National Polytechnique de Toulouse Toulouse, p. 200p.
- Comoretto, L., Arfib, B., Chiron, S., 2007. Pesticides in the Rhône river delta (France): Basic data for a field-based exposure assessment. *Science of The Total Environment* 380, 124-132.
- Comoretto, L., Arfib, B., Talva, R., Chauvelon, P., Pichaud, M., Chiron, S., Höhener, P., 2008. Runoff of pesticides from rice fields in the Ile de Camargue (Rhône river delta, France): Field study and modeling. *Environmental Pollution* 151, 486-493.
- Confalonieri, R., Mariani, L., Bocchi, S., 2005. Analysis and modelling of water and near water temperatures in flooded rice (*Oryza sativa* L.). *Ecological Modelling* 183, 269-280.
- Confalonieri, R., Rosenmund, A.S., Baruth, B., 2009. An improved model to simulate rice yield. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 463-474.
- Cordier, F., 2011. La programmation linéaire à objectifs multiples comme outil d'évaluation participative de scénarios à l'échelle territoriale. Application au cas de la céréaliculture camarguaise. Rapport de Stage de fin d'étude, Spécialisation Production Végétale Durable, SupAgro Montpellier, p. 92.
- Cumming, G.S., Spiesman, B.J., 2006. Regional problems need integrated solutions: Pest management and conservation biology in agroecosystems. *Biological Conservation* 131, 533-543.

- Dalgaard, T., Halberg, N., Porter, J.R., 2001. A model for fossil energy use in Danish agriculture used to compare organic and conventional farming. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 87, 51-65.
- Darnhofer, I., Lindenthal, T., Bartel-Kratochvil, R., Zollitsch, W., 2009. Conventionalisation of organic farming practices: from structural criteria towards an assessment based on organic principles. A review. *Agron. Sustain. Dev.* PREPRINT.
- de Koning, G.H.J., Verburg, P.H., Veldkamp, A., Fresco, L.O., 1999. Multi-scale modelling of land use change dynamics in Ecuador. *Agricultural Systems* 61, 77-93.
- Dearden, P., Jones, S., Sartorius, R., 2002. Tools for development: A handbook for those engaged in development activity. Londres, Royaume-Uni : Department for International Development (DFID).
- Degenne, A., Forsé, M., 2004. Les réseaux sociaux. Ed. Armand Colin, col. U sociologie, ISBN : 978-2-200-26662-2
- Delmotte, S., 2011. Evaluation participative de scénarios : quelles perspectives pour les systèmes agricoles camarguais? Thèse de doctorat, SupAgro Montpellier.
- Delmotte, S., Cordier, F., Toutain, C., Vadon, A., Vandeputte, B., Vianet, R., Lopez-Ridaura, S., Submitted-a. Integrated assessment of scenarios for agricultural systems at different scales: building a Bio Economic Model with stakeholders in Camargue, South of France. *To be submitted Agricultural Systems*.
- Delmotte, S., Le Page, C., Mailly, F., Mouret, J.-C., Lopez Ridaura, S., Submitted-b. A multi-scale agent-based model for participatory integrated assessment of agricultural systems: application to the EU Common Agricultural Policy reform in Camargue (South of France). *To be submitted to Agriculture, Ecosystems & Environment*.
- Delmotte, S., Lopez-Ridaura, S., Barbier, J., Wery, J., Submitted-c. Participatory scenario assessment of alternative agricultural systems from farm to regional level. *To be Submitted to the Journal of Environmental management*.
- Delmotte, S., Lopez-Ridaura, S., Barbier, J.M., Wery, J., 2010a. Integrated analysis of the extension of Organic Agriculture in the Camargue: a participatory approach for model-based indicators at different scales. 10th European IFSA Symposium, 4-7 July 2010, Vienna (Austria). 10p.
- Delmotte, S., Tittonell, P., Mouret, J.C., Hammond, R., Lopez-Ridaura, S., 2011. On farm assessment of rice yield variability and productivity gaps between organic and conventional cropping systems under Mediterranean climate. *European Journal of Agronomy* 35, 223-236.
- Delmotte, S., Vay, S., Tittonell, P., Kichou, A., Lopez-Ridaura, S., 2010b. Evaluating the variation of rice yields in Camargue using the WARM crop growth model. In: Wery, J., Shili-Touzi, I., Perrin, A. (Eds.), Proceedings of 'Agro2010 the XIth ESA congress', Montpellier, August 29th – September 3rd, 2010. ISBN: 978-2-909613-01-7. 2p.
- Diaz-Balteiro, L., Romero, C., 2004. Sustainability of forest management plans: A discrete goal programming approach. *Journal of Environmental Management* 71, 349-357.
- Doré, T., Clermont-Dauphin, C., Crozat, Y., David, C., Jeuffroy, M.-H., Loyce, C., Makowski, D., Malézieux, E., Meynard, J.-M., Valantin-Morison, M., 2008. Methodological progress in on-farm regional agronomic diagnosis. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 28, 151-161.
- Doré, T., Makowski, D., Malézieux, E., Munier-Jolain, N., Tchamitchian, M., Tittonell, P., 2011. Facing up to the paradigm of ecological intensification in agronomy: Revisiting methods, concepts and knowledge. *European Journal of Agronomy* 34, 197-210.
- Doré, T., Sebillotte, M., Meynard, J.M., 1997. A diagnostic method for assessing regional variations in crop yield. *Agricultural Systems* 54, 169-188.

- Dung, L.C., Hoanh, C.T., Le Page, C., Bousquet, F., Gajaseeni, N., 2009. Facilitating dialogue between aquaculture and agriculture: lessons from role-playing games with farmers in the Mekong Delta, Vietnam. *Water Policy* 11.
- Dury, J., Schaller, N., Garcia, F., Reynaud, A., Bergez, J., 2011. Models to support cropping plan and crop rotation decisions. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 1-14.
- Edater, 2008. Etude diagnostique et prospective des activités économiques en Camargue. Parc Naturel Régional de Camargue, p. 85.
- Enfors, E.I., Gordon, L.J., Peterson, G.D., Bossio, D., 2008. Making Investments in Dryland Development Work: Participatory Scenario Planning in the Makanya Catchment, Tanzania. *Ecology and Society* 13.
- Etienne, M., 2010. Companion modelling. A participatory approach to support sustainable development. Versailles, France: QUAE.
- Etienne, M., Du Toit, D.R., Pollard, S., 2011. ARDI: a co-construction method for participatory modeling in natural resources management. *Ecology and Society* 16, 44.
- Ewert, F., van Ittersum, M.K., Heckelei, T., Therond, O., Bezlepkina, I., Andersen, E., 2011. Scale changes and model linking methods for integrated assessment of agri-environmental systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment* In Press, Corrected Proof.
- Faure, G., Gasselin, P., Triomphe, B., Temple, L., Hocdé, H. (Eds.), 2010. Innover avec les acteurs du monde rural : la recherche-action en partenariat. Paris: Quae - CTA - Presses agronomiques de Gembloux. Collection "Agricultures tropicales en poche". 224 p.
- Ferber, J., 2006. Concepts et méthodologies multi-agents. In: Amblard, F., Phan, D. (Eds.), Modélisation et simulation multi-agents, applications pour les Sciences de l'Homme et de la Société. Hermes-Sciences & Lavoisier, Londres.
- Ferraro, D.O., Rivero, D.E., Ghersa, C.M., 2009. An analysis of the factors that influence sugarcane yield in Northern Argentina using classification and regression trees. *Field Crops Research* 112, 149-157.
- Ferrero, A., Vidotto, F., 2007. Weeds and weed management in Italian rice fields. In Agro-economical traits of rice cultivation in Europe and India. Edizioni Mercurio S.r.l, Research Book. Europe-India Economic Cross Cultural Programme "Rice Net" (EU-India Rice Districts Network Promotion through Agro-Economical, Cross Cultural, and Technical Actions"), 286pp., Vercelli - Italy.
- Flichman, G., 2002. Building Agro-Environmental Indicators by the Integration of Biophysical and Economic Models for Assessing Sustainability of Agricultural Trade Liberalisation., Paper presented at the Workshop Methodological Tools for Assessing the Sustainability Impact of EU's Economic Policies, with applications to Trade Liberalisation Policies, Brussels 7-8 November 2002. Organised by CEPII - European Commission, November 2002.
- Fraser, E.D.G., Dougill, A.J., Mabee, W.E., Reed, M., McAlpine, P., 2006. Bottom up and top down: Analysis of participatory processes for sustainability indicator identification as a pathway to community empowerment and sustainable environmental management. *Journal of Environmental Management* 78, 114-127.
- Frederiksen, P., Kristensen, P., 2008. An indicator framework for analysing sustainability impacts of land use change. In: Helming, K., Perez-Soba, M., Tabbush, P. (Eds.), Sustainability Impact Assessment of Land Use Changes. Springer, pp. 293-304.
- Giampietro, M., 2003. Multi-Scale Integrated Analysis of Agro-ecosystems. CRC Press, Boca Raton, 472 pp.
- Giller, K.E., Leeuwis, C., Andersson, J.A., Andriesse, W., Brouwer, A., Frost, P., Hebinck, P., Heitkonig, I., van Ittersum, M.K., Koning, N., Ruben, R., Slingerland, M., Udo, H., Veldkamp, T., van de Vijver, C., van Wijk, M.T., Windmeijer, P., 2008. Competing Claims on Natural Resources: What Role for Science? *Ecology and Society* 13.

- Giller, K.E., Tittonell, P., Rufino, M.C., van Wijk, M.T., Zingore, S., Mapfumo, P., Adjei-Nsiah, S., Herrero, M., Chikowo, R., Corbeels, M., Rowe, E.C., Bajjukya, F., Mwijage, A., Smith, J., Yeboah, E., van der Burg, W.J., Sanogo, O.M., Misiko, M., de Ridder, N., Karanja, S., Kaizzi, C., K'ungu, J., Mwale, M., Nwaga, D., Pacini, C., Vanlauwe, B., 2011. Communicating complexity: Integrated assessment of trade-offs concerning soil fertility management within African farming systems to support innovation and development. *Agricultural Systems* 104, 191-203.
- Godet, M., 2000. The Art of Scenarios and Strategic Planning: Tools and Pitfalls. *Technological Forecasting and Social Change* 65, 3-22.
- Gosme, M., Suffert, F., Jeuffroy, M.-H., 2010. Intensive versus low-input cropping systems: What is the optimal partitioning of agricultural area in order to reduce pesticide use while maintaining productivity? *Agricultural Systems* 103, 110-116.
- Goulevant, G., Delmotte, S., 2011. Proposition of a typology for the farms producing rice in the Camargue. *Internal report*, 12p.
- Gouttenoire, L., Courmut, S., Ingrand, S., 2010. Building causal maps of livestock farming systems using a participatory method with dairy farmers., 9th European IFSA Symposium, 4-7 July 2010, Vienna (Austria), p. 8.
- Grimm, V., Berger, U., Bastiansen, F., Eliassen, S., Ginot, V., Giske, J., Goss-Custard, J., Grand, T., Heinz, S.K., Huse, G., Huth, A., Jepsen, J.U., Jørgensen, C., Mooij, W.M., Müller, B., Pe'er, G., Piou, C., Railsback, S.F., Robbins, A.M., Robbins, M.M., Rossmanith, E., Rüger, N., Strand, E., Souissi, S., Stillman, R.A., Vabø, R., Visser, U., DeAngelis, D.L., 2006. A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecological Modelling* 198, 115-126.
- Grimm, V., Berger, U., DeAngelis, D.L., Polhill, J.G., Giske, J., Railsback, S.F., 2010. The ODD protocol A review and first update. *Ecological Modelling* 221, 2760-2768.
- Guillaume, S., 2011. Adaptation d'un modèle de culture et conception d'un modèle de décision pour la gestion conjointe de l'irrigation et de la fertilisation azotée du blé dur. Thèse de doctorat, INP Toulouse, p. 217.
- Gurung, T.R., Bousquet, F., Trébuil, G., 2006. Companion Modeling, Conflict Resolution, and Institution Building: Sharing Irrigation Water in the Lingmuteychu Watershed, Bhutan. *Ecology and Society* 11, 36.
- Happe, K., Hutchings, N.J., Dalgaard, T., Kellerman, K., 2011. Modelling the interactions between regional farming structure, nitrogen losses and environmental regulation. *Agricultural Systems* 104, 281-291.
- Happe, K., Kellermann, K., Balman, A., 2006. Agent-based Analysis of Agricultural Policies: an Illustration of the Agricultural Policy Simulator AgriPoliS, its Adaptation and Behavior. *Ecology and Society* 11.
- Harger, J.R.E., Meyer, F.M., 1996. Definition of indicators for environmentally sustainable development. *Chemosphere* 33, 1749-1775.
- Hazell, P.B.R., Norton, R., 1986. Mathematical programming for economic analysis in agriculture. Macmillan Publishing Company, 400 p. (Chapter 4: Advanced techniques of Modeling a Farm).
- Helming, K., Diehl, K., Bach, H., Dilly, O., König, B., Kuhlman, T., Perez-Soba, M., Sieber, S., Tabbush, P., Tscherning, K., Wascher, D., Wiggering, H., 2011. Ex ante impact assessment of policies affecting land use, Part A: analytical framework. *Ecology and Society* 16, 27.
- Helming, K., Tscherning, K., König, B., Sieber, S., Wiggering, H., Kuhlman, T., Wascher, D., Perez-Soba, M., Smeets, P., Tabbush, P., Dilly, O., Hüttl, R., Bach, H., 2008. Ex ante impact assessment of land use changes in European regions — the SENSOR approach. In:

- Helming, K., Perez-Soba, M., Tabbush, P. (Eds.), Sustainability Impact Assessment of Land Use Changes. Springer, pp. 77-105.
- Hengsdijk, H., Bouman, B.A.M., Nieuwenhuijse, A., Jansen, H.G.P., 1999. Quantification of land use systems using technical coefficient generators: a case study for the Northern Atlantic zone of Costa Rica. *Agricultural Systems* 61, 109-121.
- Hengsdijk, H., van Ittersum, M.K., 2002. A goal-oriented approach to identify and engineer land use systems. *Agricultural Systems* 71, 231-247.
- Hengsdijk, H., van Ittersum, M.K., 2003. Formalizing agro-ecological engineering for future-oriented land use studies. *European Journal of Agronomy* 19, 549-562.
- Hengsdijk, H., van Ittersum, M.K., Rossing, W.A.H., 1998. Quantitative analysis of farming systems for policy formulation: development of new tools. *Agricultural Systems* 58, 381-394.
- Henseler, M., Wirsig, A., Herrmann, S., Krimly, T., Dabbert, S., 2009. Modeling the impact of global change on regional agricultural land use through an activity-based non-linear programming approach. *Agricultural Systems* 100, 31-42.
- Hérault, A., 2010. Construction d'une base de données sur les activités d'élevages en Camargue. SupAgro, Montpellier.
- Heurteaux, P., 1994. Essai de quantification des termes du bilan hydrique des étangs du système Vaccarès (Camargue, France). *Ann. Limnol. - Int. J. Lim.* 30, 131-144
- Hill, J.E., Williams, J.F., Mutters, R.G., Greer, C.A., 2004. The California Rice cropping system: Agronomic and Natural resource issues for long-term sustainability. In: Ferrero, A., Vidotto, F. (Eds.), Challenges and Opportunities for Sustainable Rice-Based production systems. Edizioni Mercurio, Torino, Italy, 13-15 September. 6p.
- Hjortsø, C.N., Christensen, S.M., Tarp, P., 2005. Rapid stakeholder and conflict assessment for natural resource management using cognitive mapping: The case of Damdoi Forest Enterprise, Vietnam. *Agriculture and Human Values* 22, 149-167.
- Höhener, P., Comoretto, L., Al Housari, F., Chauvelon, P., Pichaud, M., Cherain, Y., Chiron, S., 2010. Modelling anthropogenic substances in coastal wetlands: application to herbicides in the Camargue (France). *Environmental Modelling and Software* 25, 1837-1844.
- Hubert, B., Rosegrant, M., van Boekel, M., Ortiz, R., 2010. The Future of Food: Scenarios for 2050. *Crop Science* 50, S33-S50.
- Jaeck, M., 2010. Emergence d'une complémentarité stratégique entre agriculture et biodiversité dans les territoires à haute valeur environnementale : l'exemple de la Camargue. Thèse de doctorat, Economie et gestion. UMR Lameta - INRA. 195p.
- Jaeck, M., Lifran, R., 2009. Preferences, Norms and Constraints in farmers' agro-ecological choices. Case study using a choice experiments survey in the Rhone River Delta, France., 2009 Conference (53rd), February 11-13, 2009, Cairns, Australia 47948. Australian Agricultural and Resource Economics Society.
- Jakku, E., Thorburn, P.J., 2010. A conceptual framework for guiding the participatory development of agricultural decision support systems. *Agricultural Systems* 103, 675-682.
- Jansen, H.G.P., Stoorvogel, J.J., 1998. Quantification of aggregation bias in regional agricultural land use models: application to Guácimo county, Costa Rica. *Agricultural Systems* 58, 417-439.
- Janssen, S., Louhichi, K., Kanellopoulos, A., Zander, P., Flichman, G., Hengsdijk, H., Meuter, E., Andersen, E., Belhouchette, H., Blanco, M., Borkowski, N., Heckeley, T., Hecker, M., Li, H., Oude Lansink, A., Stokstad, G., Thorne, P., van Keulen, H., van Ittersum, M., 2010. A Generic Bio-Economic Farm Model for Environmental and Economic Assessment of Agricultural Systems. *Environmental Management* 46, 862-877.

- Janssen, S., van Ittersum, M.K., 2007. Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. *Agricultural Systems* 94, 622-636
- Jepsen, A.L., Eskerod, P., 2009. Stakeholder analysis in projects: Challenges in using current guidelines in the real world. *International Journal of Project Management* 27, 335-343.
- Katsura, K., Maeda, S., Lubis, I., Horie, T., Cao, W., Shiraiwa, T., 2008. The high yield of irrigated rice in Yunnan, China: 'A cross-location analysis'. *Field Crops Research* 107, 1-11.
- Kaufmann, P., Stagl, S., Franks, D.W., 2009. Simulating the diffusion of organic farming practices in two New EU Member States. *Ecological Economics* 68, 2580-2593.
- Kaut, A.H.E.E., Mason, H.E., Navabi, A., O'Donovan, J.T., Spaner, D., 2008. Organic and conventional management of mixtures of wheat and spring cereals. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 363-371.
- Kerselaers, E., De Cock, L., Lauwers, L., Van Huylenbroeck, G., 2007. Modelling farm-level economic potential for conversion to organic farming. *Agricultural Systems* 94, 671-682.
- Kichou, A., 2009. Calibrage d'un modèle de simulation du blé dur biologique et conventionnel en Camargue. SupAgro Montpellier, France, p. 56.
- Kjeldsen, C., Dalgaard, T., Bocher, P.K., 2006. Methodological issues of modelling farm and landscape scale indicators for sustainable land systems. *Danish Journal of Geography* 106, 35-45.
- Kok, K., Biggs, R., Zurek, M., 2007. Methods for developing multiscale participatory scenarios: insights from southern Africa and Europe. *Ecology and Society* 12, 8.
- Kok, K., van Delden, H., 2009. Combining two approaches of integrated scenario development to combat desertification in the Guadalentin watershed, Spain. *Environ. Plan. B-Plan. Des.* 36, 49-66.
- Kropff, M.J., Bouma, J., Jones, J.W., 2001. Systems approaches for the design of sustainable agro-ecosystems. *Agricultural Systems* 70, 369-393.
- Laborte, A.G., 2006. Multi-scale land use analysis for agricultural policy assessment : a model-based study in Ilocos Norte province, Philippines. Thesis (doctoral) - Wageningen Universiteit, 2006.
- Laborte, A.G., Van Ittersum, M.K., Van den Berg, M.M., 2007. Multi-scale analysis of agricultural development: A modelling approach for Ilocos Norte, Philippines. *Agricultural Systems* 94, 862-873.
- Lagacherie-Valmalle, M., 1988. Diagnostic des systèmes d'élevage en Camargue : leur diversité, leur dynamique au sein du système agraire. Thèse de docteur-ingénieur, USTL Montpellier.
- Lambin, E.F., Rounsevell, M.D.A., Geist, H.J., 2000. Are agricultural land-use models able to predict changes in land-use intensity? *AGRICULTURE ECOSYSTEMS & ENVIRONMENT* 82, 321-331.
- Lambin, E.F., Turner, B.L., Geist, H.J., Agbola, S.B., Angelsen, A., Bruce, J.W., Coomes, O.T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P.S., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E.F., Mortimore, M., Ramakrishnan, P.S., Richards, J.F., Skånes, H., Steffen, W., Stone, G.D., Svedin, U., Veldkamp, T.A., Vogel, C., Xu, J., 2001. The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change* 11, 261-269.
- Le Gal, P.Y., Merot, A., Moulin, C.H., Navarrete, M., Wery, J., 2010. A modelling framework to support farmers in designing agricultural production systems. *Environmental Modelling & Software* 25, 258-268.
- Le Quéré, L., 2010. Création d'une base de données pour le calcul de coefficients techniques culturels des systèmes agricoles Camarguais. Stage fin de M1, AgroParisTech, Paris.

- Leenhardt, D., Angevin, F., Biarnès, A., Colbach, N., Mignolet, C., 2010. Describing and locating cropping systems on a regional scale. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 30, 131-138.
- LeQuere, L., 2010. Création d'une base de données pour le calcul de coefficients techniques culturaux des systèmes agricoles camarguais. *Rapport de stage de fin d'étude, INRA UMR Innovation AgroParisTech.*
- Lichtfouse, E., Navarrete, M., Debaeke, P., Souchère, V., Alberola, C., Ménassieu, J., 2009. Agronomy for sustainable agriculture. A review. *Agron. Sustain. Dev.* 29, 1-6.
- Ligtenberg, A., Wachowicz, M., Bregt, A.K., Beulens, A., Kettenis, D.L., 2004. A design and application of a multi-agent system for simulation of multi-actor spatial planning. *Journal of Environmental Management* 72, 43-55.
- Liu, M., 1997. Fondements et pratiques de la recherche action. L'harmattan (Paris).
- Lopez Ridaura, S., 2005a. Multi-scale Sustainability Evaluation : A framework for the derivation and quantification of indicators for natural resource management systems. PhD Thesis, Wageningen University, p. 202.
- Lopez Ridaura, S., 2005b. Multi-scale sustainability evaluation of natural resource management systems: Quantifying indicators for different scales of analysis and their trade-offs using linear programming. *International Journal of Sustainable Development and World Ecology* 12, 81-97.
- Lopez Ridaura, S., 2011. Coping with heterogeneity. Typologies for agricultural research and development. 3rd World Congress of Conservation Agriculture & Farming System Design, Brisbane, Australie. 26-29 sept. 2011. .
- Lopez Ridaura, S., Delmotte, S., Le Page, C., Le Quéré, L., Goulevant, G., Chauvelon, P., Sandoz, A., Mouret, J.-C., Submitted. Multi-criteria and multi-scales evaluation of different organic farming extension scenario. In: Penvern, S., Savini, I., Bellon, S. (Eds.), *Organic Farming prototype for sustainable agricultures?* Springer-Verlag
- Lopez Ridaura, S., Masera, O., Astier, M., 2002. Evaluating the sustainability of complex socio-environmental systems. the MESMIS framework. *Ecological Indicators* 2, 135-148.
- Lopez Ridaura, S., Mouret, J.-C., Hammond, R., 2010. Accompanying farmers in the search of technical alternatives for Organic Rice Production in Camargue, south of France In Proceedings of 'Agro2010 the XIth ESA congress', Montpellier, August 29th – September 3rd, 2010. ISBN: 978-2-909613-01-7. 2p.
- Lopez Ridaura, S., van Keulen, H., Van Ittersum, M.K., Leffelaar, P.A., 2005. Multiscale methodological framework to derive criteria and indicators for sustainability evaluation of peasant natural resource management systems. *Environment, Development and Sustainability* 7, 51-69.
- Louhichi, K., Alary, V., Grimaud, P., 2004. A dynamic model to analyse the bio-technical and socio-economic interactions in dairy farming systems on the Réunion Island. *Anim. Res.* 53, 363-382
- Lu, C.H., Van Ittersum, M.K., 2004. A trade-off analysis of policy objectives for Ansai, the Loess Plateau of China. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 102, 235-246.
- Lundkvist, A., Salomonsson, L., Karlsson, L., Gustavsson, A.-M.D., 2008. Effects of organic farming on weed flora composition in a long term perspective. *European Journal of Agronomy* 28, 570-578.
- Mahmood, F., Belhouchette, H., Nolot, J.M., Bergez, J.-E., Wallach, D., Wery, J., Submitted. Using expert knowledge data to validate crop models on local situation data. *European Journal of Agronomy.*
- Mailly, F., 2011. Déterminants et règles de décision des agriculteurs pour la définition de l'assolement. Application aux cas d'exploitations rizicoles camarguaises Rapport de stage de fin d'étude, ISARA Lyon, p. 98.

- Mailly, F., Delmotte, S., Mouret, J.C., Ridaura, S., Barbier, J.M., Submitted. Décisions d'assolement et changements d'usage des sols en agriculture conventionnelle et biologique : conséquences sur les surfaces en riz dans le delta de la Camargue. . *Cahier de l'Agriculture*.
- Maldidier, C., 2010. Argumentaire de défense du Riz de Camargue face à la nouvelle PAC. *Internal report of the Rice Producer Syndicate*, 40.
- Masera, O., Astier, M., Lopez Ridaura, S. (Eds.), 1999. Sustentabilidad y manejo de Recursos Naturales. El marco de evaluación MESMIS. Programas Educativos, S.A. de C.V., Calz. de Chabacano No. 65, Local A, Col. Asturias, C.P. 06850 Mexico, D.F. , Mexico.
- Mathevet, R., 2004. Camargue incertaine. Sciences, usages et natures. Buchet-Chastel Editions, Paris. 201p.
- Mathevet, R., Antona, M., Barnaud, C., Fourage, C., Trébuil, G., Aubert, S., 2010. Contextes et dépendances des processus d'accompagnement. In: Etienne, M.C. (Ed.), La modélisation d'accompagnement, Une démarche participative en appui au développement durable. Versailles : Ed. Quae, pp. p103-124.
- Mathevet, R., Bousquet, F., Le Page, C., Antona, M., 2003. Agent-based simulations of interactions between duck population, farming decisions and leasing of hunting rights in the Camargue (Southern France). *Ecological Modelling* 165, 107-126.
- Matthews, R.B., Gilbert, N.G., Roach, A., Polhill, J.G., Gotts, N.M., 2007. Agent-based land-use models: a review of applications. *Landscape Ecology* 22, 1447-1459.
- McIntosh, B.S., Giupponi, C., Voinov, A.A., Smith, C., Matthews, K.B., Monticino, M., Kolkman, M.J., Crossman, N., van Ittersum, M., Haase, D., Haase, A., Mysiak, J., Groot, J.C.J., Sieber, S., Verweij, P., Quinn, N., Waeger, P., Gaber, N., Hepting, D., Scholten, H., Sulis, A., van Delden, H., Gaddis, E., Assaf, H., 2008. Chapter Three Bridging the Gaps Between Design and Use: Developing Tools to Support Environmental Management and Policy. In: A.J. Jakeman, A.A.V.A.E.R., Chen, S.H. (Eds.), *Developments in Integrated Environmental Assessment*. Elsevier, pp. 33-48.
- Melià, P., Gatto, M., 2005. A stochastic bioeconomic model for the management of clam farming. *Ecological Modelling* 184, 163-174.
- Mendez-del-Villar, P., 1987. Economie des systèmes rizicoles camarguais. Thèse docteur 3ème cycle, Université Montpellier 1, p. 200p.
- Meynard, J.M., 2008. Produire autrement : réinventer les systèmes de culture. In "Des systèmes de culture innovants et durables : quelles méthodes pour les mettre au point et les évaluer ?" R.Reau et T Doré, Educagri, Dijon.
- Monier, C., Mouret, J.C., Hammond, R., 2009. La Paille de Riz. Pratiques au champ et filières de valorisation pour un développement durable. UMR Innovation-INRA. 35p.
- Monticino, M., Acevedo, M., Callicott, B., Cogdill, T., Lindquist, C., 2007. Coupled human and natural systems: A multi-agent-based approach. *Environmental Modelling & Software* 22, 656-663.
- Moss, S., 2002. Agent Based Modelling for Integrated Assessment. *Integrated Assessment* 3, 63-77.
- Mouret, J.-C., Hammond, R., 2003. Elaboration de références agronomiques pour la conduite de la culture du riz (*Oryza sativa* L.) à partir de l'analyse des facteurs de variabilité du rendement. . 3era. Conferencia Internacional de Arroz de Clima Templado, Punta del Este - Uruguay, p. 19.
- Mouret, J.-C., 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 systems*. Edizioni Mercurio, Torino, Italy, 13-15 September. 13p.

- Mouret, J.-C., Marnotte, P., Hammond, R., Lannes, G., Roux, S., 2001. Effets du sarclage mécanique sur le peuplement végétal en riziculture biologique camarguaise (France). AFPP - Dix huitième conférence du COLUMA. Journées Internationales sur la lutte contre les mauvaises herbes Toulouse 5-7 décembre 2001, p. 8.
- Mouret, J.C., 1988. Etude de l'Agrosystème rizicole en Camargue dans ses relations avec le milieu et le système cultural : aspects particuliers de la fertilité. Université des Sciences et Techniques du Languedoc, p. 224p.
- Mouret, J.C., 2010. L'évolution des pratiques agricoles en relation avec la mise en oeuvre d'une riziculture durable. 40ème anniversaire du Parc Naturel Régional de Camargue, Arles.
- Mouret, J.C., Hammond, R., Le Velly, R., 2011. Analyse des points de vue des riziculteurs camarguais sur la durabilité des systèmes de production agricole. Compte rendu d'étude scientifique. UMR Innovation - INRA Montpellier. 49p.
- Mussnug, F., Becker, M., Son, T.T., Buresh, R.J., Vlek, P.L.G., 2006. Yield gaps and nutrient balances in intensive, rice-based cropping systems on degraded soils in the Red River Delta of Vietnam. *Field Crops Research* 98, 127-140.
- Naivinit, W., Le Page, C., Trébuil, G., Gajasen, N., 2010. Participatory agent-based modeling and simulation of rice production and labor migrations in Northeast Thailand. *Environmental Modelling & Software* 25, 1345-1358.
- Neef, A., Neubert, D., 2010. Stakeholder participation in agricultural research projects: a conceptual framework for reflection and decision-making. *Agriculture and Human Values*, 1-16.
- Newig, J., Haberl, H., Pahl-Wostl, C., Rothman, D.S., 2008. Formalised and Non-Formalised Methods in Resource Management-Knowledge and Social Learning in Participatory Processes: An Introduction. *SYSTEMIC PRACTICE AND ACTION RESEARCH* 21, 381-387.
- Nicolucci, V., Galli, A., Kitzes, J., Pulselli, R.M., Borsa, S., Marchettini, N., 2008. Ecological Footprint analysis applied to the production of two Italian wines. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 128, 162-166.
- Overmars, K.P., Verburg, P.H., 2006. Multilevel modelling of land use from field to village level in the Philippines. *Agricultural Systems* 89, 435-456.
- Overmars, K.P., Verburg, P.H., Veldkamp, T., 2007. Comparison of a deductive and an inductive approach to specify land suitability in a spatially explicit land use model. *Land Use Policy* 24, 584-599.
- Pahl-Wostl, C., 2002a. Agent Based Simulation in Integrated Assessment and Resources Management., Paper presented at the Second Conference of International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs), Lugano, Switzerland.
- Pahl-Wostl, C., 2002b. Participative and Stakeholder-Based Policy Design, Evaluation and Modeling Processes. *Integrated Assessment* 1.
- Parker, D.C., Hessl, A., Davis, S.C., 2008. Complexity, land-use modeling, and the human dimension: Fundamental challenges for mapping unknown outcome spaces. *Geoforum* 39, 789-804.
- Parker, D.C., Manson, S.M., Janssen, M.A., Hoffmann, M.J., Deadman, P., 2003. Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review. *Annals of the Association of American Geographers* 93, 314-337.
- Parker, P., Letcher, R., Jakeman, A., Beck, M.B., Harris, G., Argent, R.M., Hare, M., Pahl-Wostl, C., Voinov, A., Janssen, M., Sullivan, P., Scoccimarro, M., Friend, A., Sonnenshein, M., Barker, D., Matejicek, L., Odulaja, D., Deadman, P., Lim, K., Larocque, G., Tarikhi, P., Fletcher, C., Put, A., Maxwell, T., Charles, A., Breeze, H., Nakatani, N., Mudgal, S., Naito, W., Osidele, O., Eriksson, I., Kautsky, U., Kautsky, E., Naeslund, B.,

- Kumblad, L., Park, R., Maltagliati, S., Girardin, P., Rizzoli, A., Mauriello, D., Hoch, R., Pelletier, D., Reilly, J., Olafsdottir, R., Bin, S., 2002. Progress in integrated assessment and modelling. *Environmental Modelling & Software* 17, 209-217.
- Parra-López, C., Groot, J.C.J., Carmona-Torres, C., Rossing, W.A.H., 2009. An integrated approach for ex-ante evaluation of public policies for sustainable agriculture at landscape level. *Land Use Policy* 26, 1020-1030.
- Patel, M., Kok, K., Rothman, D.S., 2007. Participatory scenario construction in land use analysis: An insight into the experiences created by stakeholder involvement in the Northern Mediterranean. *Land Use Policy* 24, 546-561.
- Payraudeau, S., van der Werf, H.M.G., 2005. Environmental impact assessment for a farming region: a review of methods. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 107, 1-19.
- Pichon, L., 2000. La mise en place de signes collectifs de qualité dans l'agro-alimentaire : le cas du riz de Camargue. Université de Montpellier 1 - Faculté des sciences économiques. DEA Economie du développement, agro-alimentaire et rural., p. 160p.
- Picon, B., 2008. L'espace et le temps en Camargue. 3ème édition revue et augmentée. Actes Sud. 301p.
- Pierr, A., Ungaro, F., Ciancaglini, A., Happe, K., Sahrbacher, A., Sattler, C., Uthes, S., Zander, P., 2009. Integrated assessment of future CAP policies: land use changes, spatial patterns and targeting. *Environmental Science & Policy* 12, 1122-1136.
- Pontius, R.G., Cornell, J.D., Hall, C.A.S., 2001. Modeling the spatial pattern of land-use change with GEOMOD2: application and validation for Costa Rica. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 85, 191-203.
- Poussin, J.C., Wopereis, M.C.S., Debouzie, D., Maeght, J.L., 2003. Determinants of irrigated rice yield in the Senegal River valley. *European Journal of Agronomy* 19, 341-356.
- Puard, M., Clement, G., Mouret, J.-C., Roux-Cuvelier, M., 1999. Strategies for rice salinity tolerance in Mediterranean France. *Cahiers Options Méditerranéennes* 40, 83-89.
- Rabbinge, R., van Oijen, M., 1997. Scenario studies for future agriculture and crop protection. *European Journal of Plant Pathology* 103, 197-201.
- Railsback, S.F., Lytinen, S.L., Jackson, S.K., 2006. Agent-based Simulation Platforms: Review and Development Recommendations. *SIMULATION* 82, 609-623.
- Reidsma, P., König, H., Feng, S., Bezlepkina, I., Nesheim, I., Bonin, M., Sghaier, M., Purushothaman, S., Sieber, S., van Ittersum, M.K., Brouwer, F., 2011. Methods and tools for integrated assessment of land use policies on sustainable development in developing countries. *Land Use Policy* 28, 604-617.
- Renting, H., Rossing, W.A.H., Groot, J.C.J., Van der Ploeg, J.D., Laurent, C., Perraud, D., Stobbelaar, D.J., Van Ittersum, M.K., 2009. Exploring multifunctional agriculture. A review of conceptual approaches and prospects for an integrative transitional framework. *Journal of Environmental Management* 90, S112-S123.
- Ridder, D., Pahl-Wostl, C., 2005. Participatory Integrated Assessment in local level planning. *Regional Environmental Change* 5, 188-196.
- Righi, E., Dogliotti, S., Stefanini, F.M., Pacini, G.C., 2011. Capturing farm diversity at regional level to up-scale farm level impact assessment of sustainable development options. *Agriculture, Ecosystems & Environment* In Press, Corrected Proof.
- Rivière-Honegger, A., 1989. Le gestion de l'eau agricole en Camargue. *Etudes camarguaises* 19, 23-78.
- Roche, H., Buet, A., Jonot, O., Ramade, F., 2000. Organochlorine residues in european eel (*Anguilla anguilla*), crucian carp (*Carassius carassius*) and catfish (*Ictalurus nebulosus*) from Vaccarès lagoon (French National Nature Reserve of Camargue) - effects on some physiological parameters. *Aquatic Toxicology* 48, 443-459.

- Roel, A., Firpo, H., Plant, R.E., 2007. Why do some farmers get higher yields? Multivariate analysis of a group of Uruguayan rice farmers. *Computers and Electronics in Agriculture* 58, 78-92.
- Roetter, R., van Keulen, H., Hengsdijk, H., van den Berg, M., van Laar, G., 2007a. Sustainable resource management and policy options for rice ecosystems. *Agricultural Systems* 94, 763-765.
- Roetter, R.P., Hoanh, C.T., Laborte, A.G., Van Keulen, H., Van Ittersum, M.K., Dreiser, C., Van Diepen, C.A., De Ridder, N., Van Laar, H.H., 2005. Integration of Systems Network (SysNet) tools for regional land use scenario analysis in Asia. *Environmental Modelling & Software* 20, 291-307.
- Roetter, R.P., van den Berg, M., Laborte, A.G., Hengsdijk, H., Wolf, J., van Ittersum, M., van Keulen, H., Agustin, E.O., Thuc Son, T., Xuan Lai, N., Guanghuo, W., 2007b. Combining farm and regional level modelling for Integrated Resource Management in East and South-east Asia. *Environmental Modelling & Software* 22, 149-157.
- Roger, M., Marc, V., Patrick, A., 2002. Effects of the spatial organization of agricultural management on the hydrological behaviour of a farmed catchment during flood events. *Hydrological Processes* 16, 393-412.
- Ronfort, C., Souchère, V., Martin, P., Sebillotte, C., Castellazzi, M.S., Barbottin, A., Meynard, J.M., Laignel, B., 2011. Methodology for land use change scenario assessment for runoff impacts: A case study in a north-western European Loess belt region (Pays de Caux, France). *CATENA* 86, 36-48.
- Rossing, W.A.H., 2009. Periodic Activity Report Year 2. *EULACIAS project, Breaking the spiral of unsustainability in arid and semi-arid areas in Latin America using an ecosystem approach for coinnovation of farm livelihoods*, 151 p.
- Rossing, W.A.H., 2011. The role of systems analysis in co-learning. 3rd World Congress of Conservation Agriculture & Farming System Design, Brisbane, Australie. 26-29 sept. 2011. .
- Rossing, W.A.H., Zander, P., Josien, E., Groot, J.C.J., Meyer, B.C., Knierim, A., 2007. Integrative modelling approaches for analysis of impact of multifunctional agriculture: A review for France, Germany and The Netherlands. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 120, 41-57.
- Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J.-E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Messéan, A., Doré, T., 2009. MASC, a qualitative multi-attribute decision model for ex ante assessment of the sustainability of cropping systems. *Agronomy for Sustainable Development* 29, 447-461.
- Sadok, W., Angevin, F., Bergez, J.E., Bockstaller, C., Colomb, B., Guichard, L., Reau, R., Doré, T., 2008. Ex ante assessment of the sustainability of alternative cropping systems: review of the implications for using multi-criteria decision aid methods. *Agronomy for Sustainable Development* 28, 163-174.
- Salter, J., Robinson, J., Wiek, A., 2010. Participatory methods of integrated assessment—a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 1, 697-717.
- Sattler, C., Nagel, U.J., Werner, A., Zander, P., 2010. Integrated assessment of agricultural production practices to enhance sustainable development in agricultural landscapes. *Ecological Indicators* 10, 49-61.
- Schaller, N., 2011. Modélisation des décisions d'assolement des agriculteurs et de l'organisation spatiale des cultures dans les territoires de polyculture-élevage. Thèse de doctorat, AgroParisTech.
- Schreinemachers, P., Berger, T., 2006. Land use decisions in developing countries and their representation in multi-agent systems. *Journal of Land Use Science* 1, 29 - 44.

- Schreinemachers, P., Berger, T., Aune, J.B., 2007. Simulating soil fertility and poverty dynamics in Uganda: A bio-economic multi-agent systems approach. *Ecological Economics* 64, 387-401.
- Scoones, I., Thompson, J., 1994. Knowledge, power and agriculture - towards a theoretical understanding In: Scoones, I., Thompson, J. (Eds.), *Beyond Farmer First: Rural People's Knowledge, Agricultural Research and Extension Practice*. IT Publications, London, pp. 15-32.
- Semaan, J., Flichman, G., Scardigno, A., Steduto, P., 2007. Analysis of nitrate pollution control policies in the irrigated agriculture of Apulia Region (Southern Italy): A bio-economic modelling approach. *Agricultural Systems* 94, 357-367.
- Siebenhüner, B., Barth, V., 2005. The role of computer modelling in participatory integrated assessments. *Environmental Impact Assessment Review* 25, 367-389.
- Simon, C., Etienne, M., 2009. A companion modelling approach applied to forest management planning with the Société Civile des Terres du Larzac. *Environmental Modelling & Software* In Press, Corrected Proof.
- Simon, C., Etienne, M., 2010. A companion modelling approach applied to forest management planning. *Environmental Modelling & Software* 25, 1371-1384.
- Sterk, B., 2007. A window of opportunities : The contributions of land use modelling to societal learning. *Thèse*, p. 136.
- Sterk, B., Leeuwis, C., van Ittersum, M.K., 2009. Land use models in complex societal problem solving: Plug and play or networking? *Environmental Modelling & Software* 24, 165-172.
- Sterk, B., van Ittersum, M.K., Leeuwis, C., 2011. How, when, and for what reasons does land use modelling contribute to societal problem solving? *Environmental Modelling & Software* 26, 310-316.
- Sterk, B., van Ittersum, M.K., Leeuwis, C., Rossing, W.A.H., van Keulen, H., van de Ven, G.W.J., 2006. Finding niches for whole-farm design models - contradictio in terminis? *Agricultural Systems* 87, 211-228.
- Sterk, B., van Ittersum, M.K., Leeuwis, C., Wijnands, F.G., 2007. Prototyping and farm system modelling--Partners on the road towards more sustainable farm systems? *European Journal of Agronomy* 26, 401-409.
- Steyaert, P., Barzman, M., Billaud, J.-P., Brives, H., Hubert, B., Ollivier, G., Roche, B., 2007. The role of knowledge and research in facilitating social learning among stakeholders in natural resources management in the French Atlantic coastal wetlands. *Environmental Science & Policy* 10, 537-550.
- Tercia-Consultant, 2005. Etude de la validité yechnico-économique du mode de production biologique comparé au mode conventionnel en riziculture camarguaise. p. 76.
- Therond, O., Belhouchette, H., Jansen, S., Louhichi, K., Ewert, F., Bergez, J.E., Wery, J., Heckelei, T., Alkan Olsson, J., Leenhardt, D., Van Ittersum, M.K., 2009. Methodology to translate policy assessment problems into scenarios: the example of the SEAMLESS integrated framework. *Environmental Science and Policy* 12, 619-630.
- Therond, O., Hengsdijk, H., Casellas, E., Wallach, D., Adam, M., Belhouchette, H., Oomen, R., Russell, G., Ewert, F., Bergez, J.-E., Janssen, S., Wery, J., Van Ittersum, M.K., 2011. Using a cropping system model at regional scale: Low-data approaches for crop management information and model calibration. *Agriculture, Ecosystems & Environment* In Press, Corrected Proof.
- Thieu, V., Billen, G., Garnier, J., Benoît, M., 2011. Nitrogen cycling in a hypothetical scenario of generalised organic agriculture in the Seine, Somme and Scheldt watersheds. *Regional Environmental Change* 11, 359-370.

- Tissue, S., Wilensky, U., 2004. NetLogo: A simple environment for modeling complexity. . Paper presented at the International Conference on Complex Systems, Boston, May 16 - 21.
- Tittonell, P., Muriuki, A., Shepherd, K.D., Mugendi, D., Kaizzi, K.C., Okeyo, J., Verchot, L., Coe, R., Vanlauwe, B., 2010. The diversity of rural livelihoods and their influence on soil fertility in agricultural systems of East Africa - A typology of smallholder farms. *Agricultural Systems* 103, 83-97.
- Tittonell, P., Shepherd, K.D., Vanlauwe, B., Giller, K.E., 2008. Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya--An application of classification and regression tree analysis. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 123, 137-150.
- Valantin-Morison, M., Meynard, J.M., 2008. Diagnosis of limiting factors of organic oilseed rape yield. A survey of farmers' fields. *Agron. Sustain. Dev.* 28, 527-539.
- Valbuena, D., Verburg, P.H., Bregt, A.K., 2008. A method to define a typology for agent-based analysis in regional land-use research. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 12, 27-36.
- Valbuena, D., Verburg, P.H., Bregt, A.K., Ligtenberg, A., 2009. An agent-based approach to model land-use change at a regional scale. *Landscape Ecology* 25, 185-199.
- van der Hilst, F., Dornburg, V., Sanders, J.P.M., Elbersen, B., Graves, A., Turkenburg, W.C., Elbersen, H.W., van Dam, J.M.C., Faaij, A.P.C., 2010. Potential, spatial distribution and economic performance of regional biomass chains: The North of the Netherlands as example. *Agricultural Systems* 103, 403-417.
- van der Werf, H.M.G., Petit, J., 2002. Évaluation de l'impact environnemental de l'agriculture au niveau de la ferme : comparaison et analyse de 12 méthodes basées sur des indicateurs. *Courrier de l'Environnement* n° 46, juin, 121-133. INRA. <http://www.inra.fr/dpenv/vandec146.htm>
- van Ittersum, M.K., Ewert, F., Heckelei, T., Wery, J., Alkan Olsson, J., Andersen, E., Bezlepkina, I., Brouwer, F., Donatelli, M., Flichman, G., Olsson, L., Rizzoli, A.E., van der Wal, T., Wien, J.E., Wolf, J., 2008. Integrated assessment of agricultural systems - A component-based framework for the European Union (SEAMLESS). *Agricultural Systems* 96, 150-165.
- van Ittersum, M.K., Rabbinge, R., 1997. Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research* 52, 197-208.
- van Ittersum, M.K., Rabbinge, R., van Latesteijn, H.C., 1998. Exploratory land use studies and their role in strategic policy making. *Agricultural Systems* 58, 309-330.
- van Ittersum, M.K., Roetter, R.P., van Keulen, H., de Ridder, N., Hoanh, C.T., Laborte, A.G., Aggarwal, P.K., Ismail, A.B., Tawang, A., 2004. A systems network (SysNet) approach for interactively evaluating strategic land use options at sub-national scale in South and South-east Asia. *Land Use Policy* 21, 101-113.
- van Ittersum, M.K., Wery, J., 2007. Integrated assessment of agricultural systems at multiple scales. In: *Scale and Complexity in Plant Systems Research: Gene-Plant-Crop Relations*, Springer, pp 303-317.
- van Keulen, H., 2007. Quantitative analyses of natural resource management options at different scales. *Agricultural Systems* 94, 768-783.
- van Notten, P.W.F., Rotmans, J., van Asselt, M.B.A., Rothman, D.S., 2003. An updated scenario typology. *Futures* 35, 423-443.
- van Paassen, A., Roetter, R.P., van Keulen, H., Hoanh, C.T., 2007. Can computer models stimulate learning about sustainable land use? Experience with LUPAS in the humid (sub-)tropics of Asia. *Agricultural Systems* 94, 874-887.

- Vay, S., 2009. Calibrage d'un modèle de simulation du riz aux conditions de culture en Camargue. SupAgro Montpellier, France, p. 44.
- Vayssières, J., Bocquier, F., Lecomte, P., 2009. GAMEDE: A global activity model for evaluating the sustainability of dairy enterprises. Part II - Interactive simulation of various management strategies with diverse stakeholders. *Agricultural Systems* 101, 139-151.
- Vayssières, J., Vigne, M., Alary, V., Lecomte, P., 2011. Integrated participatory modelling of actual farms to support policy making on sustainable intensification. *Agricultural Systems* 104, 146-161.
- Veldkamp, A., Fresco, L.O., 1996a. CLUE-CR: An integrated multi-scale model to simulate land use change scenarios in Costa Rica. *Ecological Modelling* 91, 231-248.
- Veldkamp, A., Fresco, L.O., 1996b. CLUE: a conceptual model to study the Conversion of Land Use and its Effects. *Ecological Modelling* 85, 253-270.
- Verburg, K., Kok, K., Veldkamp, A., 2005. Pixels or agents? Modelling land-use and land-cover change. *IHDP Update* 03/2005, 8-9.
- Verburg, P.H., Overmars, K.P., Huigen, M.G.A., de Groot, W.T., Veldkamp, A., 2006. Analysis of the effects of land use change on protected areas in the Philippines. *Applied Geography* 26, 153-173.
- Verburg, P.H., Schot, P.P., Dijst, M.J., Veldkamp, A., 2004. Land use change modelling: current practice and research priorities. *GeoJournal* 61, 309-324.
- Verburg, P.H., Soepboer, W., Veldkamp, A., Limpiada, R., Espaldon, V., Mastura, S.S.A., 2002. Modeling the Spatial Dynamics of Regional Land Use: The CLUE-S Model. *Environmental Management* 30, 391-405.
- Vilain, L., 2008. La méthode IDEA - Indicateurs de durabilité des exploitations agricoles - Guide d'utilisation, 3ème édition, Editions Educagri, Dijon, 100 p. .
- Voinov, A., Bousquet, F., 2010. Modelling with stakeholders. *Environmental Modelling & Software* 25, 1268-1281.
- Waithaka, M.M., Thornton, P.K., Herrero, M., Shepherd, K.D., 2006. Bio-economic evaluation of farmers' perceptions of viable farms in western Kenya. *Agricultural Systems* 90, 243-271.
- Washington-Ottombre, C., Pijanowski, B., Campbell, D., Olson, J., Maitima, J., Musili, A., Kibaki, T., Kaburu, H., Hayombe, P., Owango, E., Irigia, B., Gichere, S., Mwangi, A., 2010. Using a role-playing game to inform the development of land-use models for the study of a complex socio-ecological system. *Agricultural Systems* 103, 117-126.
- Wery, J., Merot, A., Belhouchette, H., Dupraz, C., Metay, A., Rapidel, B., Delmotte, S., Lamanda, N., Metral, R., Ridaura, S., Talbot, G., Gary, C., 2011. Developing and using Indicators for Ecologically Intensive and Sustainable Cropping Systems. 3rd World Congress of Conservation Agriculture & Farming System Design, Brisbane, Australie. 26-29 sept. 2011. .
- White, R., Engelen, G., 2000. High-resolution integrated modelling of the spatial dynamics of urban and regional systems. *Computers, Environment and Urban Systems* 24, 383-400.
- Wilensky, U., 1999. NetLogo. Evanston, IL: Center for Connected Learning and Computer-based Modeling, Northwestern University. <http://ccl.northwestern.edu/netlogo/>.
- Yun, J.I., 2003. Predicting regional rice production in South Korea using spatial data and crop-growth modeling. *Agricultural Systems* 77, 23-38.
- Zander, P., Kächele, H., 1999. Modelling multiple objectives of land use for sustainable development. *Agricultural Systems* 59, 311-325.

Liste des figures

FIGURE 1.1 : CARTE DU TERRITOIRE CAMARGUAIS	21
FIGURE 1.2 : PHOTOS DE LA CAMARGUE.	22
FIGURE 1.3 : EVOLUTION DES SURFACES EN RIZ EN CAMARGUE, EN FONCTION DES DIFFERENTS CHANGEMENTS DE CONTEXTE NATIONAL ET INTERNATIONAL, D' APRES MOURET (2010).	24
FIGURE 1.4 : OCCUPATION DU SOL EN 2006 EN CAMARGUE.	26
FIGURE 1.5 : PHOTOS DE CAMARGUE.	27
FIGURE 1.6 : ENCHAINEMENT DES QUATRE PHASES DE LA DEMARCHE MISE EN ŒUVRE EN CAMARGUE POUR L' EVALUATION DES SCENARIOS.	32
FIGURE 2.1: TYPE OF RESULTS PRODUCED BY LAND USE CHANGE STUDIES.	47
FIGURE 2.2: TYPE OF RESULTS PRODUCED BY BIO-ECONOMIC MODELS.	51
FIGURE 2.3: TYPE OF RESULTS PRODUCED BY AGENT-BASED MODELS.	55
FIGURE 3.1 : DEROULEMENT PREVISIONNEL DES INTERACTIONS AVEC LES ACTEURS LOCAUX DU TERRITOIRE AU COURS DES QUATRE PHASES DE LA DEMARCHE.	73
ENCADRE 3.1 : LISTE DES ACTEURS RENCONTRES	78
FIGURE 4.1 : CARTOGRAPHIE DES SOLS EN FONCTION DE LA CLASSIFICATION PROPOSEE.	99
FIGURE 4.2 : CARTE DU TERRITOIRE CAMARGUAIS.	110
FIGURE 4.3 : CARTOGRAPHIE DES ASA D' ASSAINISSEMENT SUR LE TERRITOIRE CAMARGUAIS.	111
FIGURE 4.4 : CARTOGRAPHIE DES TYPES D' EXPLOITATIONS AGRICOLES CAMARGUAISES.	114
FIGURE 5.1 : COMPARAISON DES RENDEMENTS SIMULES PAR STICS ET DES RENDEMENTS A DIRE D' EXPERT.	160
FIGURE 5.2 : ÉCART A LA MOYENNE DES COEFFICIENTS TECHNIQUES PAR CULTURE ET PAR MODE DE CONDUITE (BIOLOGIQUE OU CONVENTIONNEL).	164
FIGURE 5.3: ÉCART A LA MOYENNE DE LA MARGE BRUTE PAR CULTURE, TYPE DE SOL ET MODE DE CONDUITE (BIOLOGIQUE OU CONVENTIONNEL).	165
FIGURE 1: UML CLASS DIAGRAM OF THE IMPASIAS MODEL.	183
FIGURE 2: PICTURES OF THE FIRST SIMULATION SESSION AT THE FURPI OFFICE AND OF THE THIRD IN A FARM. ...	191
FIGURE 3: A. EVOLUTION OF THE GROSS MARGIN OF TWO FARMS AS AFFECTED BY THE CAP REFORM AND ADAPTATION STRATEGY OF THE FARMER. IN CONTINUOUS LINE, THE COUPLED PAYMENT FOR RICE IS SUPPRESSED, IN DOTTED LINE, THIS SUPPRESSION IS COMPENSATED WITH A REVALORIZATION OF THE DIRECT PAYMENT, AS EXPECTED IN 2012. B. THREE 15 DAYS- AVERAGE OF THE WORKING TIME (IN HOUR) AT FARM SCALE FOR A MIDDLE SIZE SPECIALIZED RICE GROWER. YEAR 1 IS THE CURRENT SITUATION AND YEAR 5 IS AFTER FARMER ADAPTED ITS LAND USE STRATEGY.	193
FIGURE 4: A. EVOLUTION OF THE AREA OF EACH CROP AT REGIONAL SCALE (CONVENTIONAL AND ORGANIC ARE CONFOUNDED HERE), B EVOLUTION OF THE REGIONAL VALUE OF PRODUCTION (10M€), OF THE TREATMENT FREQUENCY INDEX (TFI, NO UNIT), OF THE PROPORTION OF RICE IN THE CULTIVATED AREA AND OF ORGANIC FARMING (OF). C. EVOLUTION OF THE PRODUCTION IN TONS OF THE MAIN CROPS IN CONVENTIONAL SYSTEMS (PASTURES ARE EXCLUDED AS IT IS ENTIRELY SELF-CONSUMED IN FARMS) AND (D) IN ORGANIC SYSTEMS.	199
FIGURE 1: PHASES OF EVALUATION OF SCENARIOS RELATED TO AGRICULTURAL SYSTEMS EVOLUTION.	217
FIGURE 2: SPIDER DIAGRAMS MADE WITH SIX INDICATORS NORMALIZED FOR THREE DIFFERENT SCENARIOS OF RICE COUPLED PAYMENT (RICE CP) LEVEL.	227
FIGURE 3: EVOLUTION OF THE PROPORTION OF CULTIVATED LANDS USED FOR RICE CULTIVATION AT REGIONAL SCALE, FOR THE FIVE SCENARIOS OF PRICES AND AN AMOUNT OF COUPLED PAYMENT BETWEEN 0 AND 450 €HA ⁻¹	228
FIGURE 4: TRADE-OFF CURVES BETWEEN THE PROPORTION OF RICE IN THE FARM AREA, THE AVERAGE GROSS MARGIN AND THE TREATMENT FREQUENCY INDEX (TFI) FOR A LIVESTOCK BREEDING FARM (ON THE LEFT) AND A SPECIALIZED RICE PRODUCER (ON THE RIGHT).	229
FIGURE 5: (A) SPIDER DIAGRAM OF THREE SCENARIOS AT REGIONAL SCALE OF TFI: THE CURRENT TFI LEVEL, A REGIONAL TFI OF 1.5 AND A TFI OF 1.2. (B) TRADE OFF CURVES BETWEEN THE TFI OF TWO FARM TYPES AND THE REGIONAL TFI.	230

Liste des tableaux

TABLE 2.1: COMPARISON OF THE THREE APPROACHES ON THE BASIS OF THEIR SUITABILITY FOR PIMPAAS.	60
TABLEAU 3.1 : DESCRIPTION DES PRINCIPAUX ACTEURS INTERVENANTS SUR LE TERRITOIRE CAMARGUAIS.....	75
TABLEAU 3.2 : ETAPES DE L'ENTRETIEN ET PRODUITS POUR LA CONSTRUCTION DES SCENARIOS AVEC LES ACTEURS.....	79
TABLEAU 3.3. PRINCIPAUX ACTEURS CONCERNES PAR LES CHANGEMENTS AGRICOLES EN CAMARGUE, AINSI QUE LEURS ECHELLES D'INTERETS.	84
TABLEAU 3.4 : PRINCIPAUX CHANGEMENTS ENVISAGES PAR LES ACTEURS POUR L'EVOLUTION DU TERRITOIRE....	86
TABLEAU 3.5 : CRITERES SOUHAITES PAR LES ACTEURS POUR EVALUER LES SCENARIOS, AINSI QUE LES ECHELLES OU DES INDICATEURS SERAIENT CALCULES.	88
TABLEAU 3.6 : INDICATEURS RETENUS POUR L'EVALUATION DES SCENARIOS ET IMPLEMENTES DANS LES MODELES (VOIR CHAPITRE 6 ET 7).....	90
TABLEAU 4.1 : DESCRIPTION DES VALEURS POSSIBLES DES CINQ CRITERES DE DEFINITION DE L'ACTIVITE AGRICOLE.	97
TABLEAU 4.2 : CARACTERISTIQUES DES QUATRE TYPES DE SOLS CULTIVES EN CAMARGUE.	98
TABLEAU 4.3 : DESCRIPTION DES TYPES D'EXPLOITATIONS AGRICOLES CAMARGUAISES PROPOSEES.....	107
TABLE 4.4 : DESCRIPTION DES TYPES DE SOL POUR CHAQUE TYPE D'EXPLOITATION.	108
TABLEAU 4.5 : POURCENTAGE DE LA SUPERFICIE ET DU NOMBRE D'EXPLOITATIONS A L'ECHELLE REGIONALE POUR CHAQUE TYPE D'EXPLOITATION, Y COMPRIS CELLES NE PRODUISANT PAS DE RIZ.	113
TABLEAU 4.6 : SPATIALISATION DES TYPES D'EXPLOITATIONS AU SEIN DE LA REGION ET DES SOUS-REGIONS.	115
TABLEAU 5.1 : INDICATEURS CALCULES A L'ECHELLE DE LA PARCELLE DONT LE CALCUL EST BASE SUR DES COEFFICIENTS TECHNIQUES.	121
TABLEAU 5.2 : RENDEMENTS DU BLE-DUR ET CAUSE DE PERTES DE RENDEMENTS DEFINIS A DIRE D'EXPERT POUR LES ITINERAIRES DITS « INTENSIFS » ET POUR UN PRECEDENT SEC.	156
TABLEAU 5.3 : DETAILS DE L'ITINERAIRE TECHNIQUE DES ACTIVITES RIZ CONVENTIONNELLES.....	162
TABLEAU 5.4 : EXTRAIT DE LA BASE DE DONNEES.	162
TABLEAU 5.5 : SOURCES DES DONNEES UTILISEES POUR LE CALCUL DES DIFFERENTS COEFFICIENTS TECHNIQUES EVALUES POUR CHAQUE ACTIVITE AGRICOLE.	166
TABLE 1: INDICATORS CALCULATED BY THE IMPASIAS MODEL AT DIFFERENT SCALES AND FOR EACH TIME-STEP OF THE INTERACTIVE SIMULATION.	185
TABLE 2: DEFINITION CRITERIA FOR THE CROPPING ACTIVITIES IN CAMARGUE	187
TABLE 3: INITIAL AND FINAL AREA OF EACH CROP IN THE 14 SIMULATED FARMS, EXPRESSED IN PERCENT OF FARM AREA.....	195

Liste des abréviations

AB : Agriculture Biologique
ABM : Agent-Based Model (modèle multi-agent)
ASA: Association Syndicale Autorisée
AOC : Appellation d'Origine Contrôlée
BEM : Bio Economic Model (modèle bioéconomique)
CNRS : Centre National de Recherche Scientifique
IFT : Indice de Fréquence des Traitements
IAAS : Integrated Assessment of Agricultural Systems
ISS : Interactive Simulation Session
INRA : Institut National de Recherche Agronomique
LECSA : Laboratoire d'Etude Comparée des Systèmes Agricoles
LUCC : Land Use / Land Cover Change (changement d'usage du sol)
PAC : Politique Agricole Commune
PNRC : Parc Naturel Régional de Camargue
MAE : Mesure Agri-Environnementale
RAP : Recherche Action en Partenariat
SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SAU : Surface Agricole Utile
SMCG : Syndicat Mixte de gestion et protection de la Camargue Gardoise
SMAGASA : Syndicat Mixte de Gestion des Associations Syndicales Autorisées
SPA : Système de production agricole
SRFF : Syndicat des Riziculteurs de France et Filière
TDV : Tour du Valat
UMR : Unité Mixte de Recherche

Annexes

ANNEXE A : GUIDE D'ENTRETIEN UTILISE LORS DES RENCONTRES AVEC LES ACTEURS.....	305
ANNEXE B : MISE EN FORME ET ANALYSE DE DONNEES SPATIALISEES SOUS SIG : OCCUPATION DU SOL ET CARACTERISATION DES SOLS CAMARGUAIS	307
ANNEXE C: RAPPORT SUR LA TYPOLOGIE DES EXPLOITATIONS DIFFUSE AUX ACTEURS LOCAUX CAMARGUAIS.	313
ANNEXE D : CALCUL DES COUTS DE MECANISATION, D'IRRIGATION ET D'ASSAINISSEMENT.	325
ANNEXE E : FICHES RECAPITULATIVES DES COEFFICIENTS TECHNIQUES CALCULES POUR CHAQUE ACTIVITE.....	329
ANNEXE F : MULTI-SCALE INTEGRATED ASSESSMENT OF REGIONAL CONVERSION TO ORGANIC FARMING.	359

Annexe A : Guide d'entretien utilisé lors des rencontres avec les acteurs

1. Présentation générale de l'entretien

Présentation de l'enquêteur : je suis doctorant en agronomie à l'INRA de Montpellier, dans l'équipe de J.-C. Mouret, qui travaille depuis près de 30 ans en Camargue. J'étudie des méthodes de construction et d'évaluation de scénarios avec les acteurs locaux portant sur l'évolution des systèmes agricoles.

L'objectif de l'entretien est de présenter le projet en cours de réalisation en Camargue et de discuter avec l'institution de son intérêt potentiel d'y participer, ainsi que de ses visions des évolutions possibles des systèmes agricoles camarguais.

Durée estimée de l'entretien : 2h.

2. Présentation du projet « Prospective Agricole Camargue »

Ce projet est à l'initiative de l'UMR Innovation, équipe de Santiago Lopez Ridaura et de J.-C. Mouret. Cette équipe dispose de compétences sur l'évaluation de scénarios et le calcul de multiples indicateurs. Nous vous proposons un projet de travail collectif en 5 phases [celles de la figure 1.6 au chapitre 1 de cette thèse] : engagement des acteurs pour la définition des scénarios (par exemple sur le thème de la PAC et de l'AB...), identification des échelles et indicateurs, puis description quantitative des systèmes agricoles, construction d'outils de simulation et évaluation participative et collective des scénarios.

Notre questionnement est méthodologique : comment mettre en œuvre une démarche d'évaluation de scénarios avec les acteurs locaux ? Nous n'avons pas de questionnement de terrain (ou appliqué à la Camargue) spécifique.

Remise du document de présentation du projet.

3. Questions posées à l'institution rencontrée

Phase de questions posées à la (aux) personnes rencontrées pour mieux connaître l'institution

Présentation de l'institution rencontrée :

- nombre de salariés, moyens, ressources ;
- missions et activités principales, missions et activités en lien avec l'agriculture ;
- budget, sources de financements ;
- bilan, évaluation des résultats ;
- unités de gestion et périmètres d'action.

Centrage sur les questions agricoles, relation agriculture/environnement, par rapport à la situation actuelle de l'agriculture dans le territoire camarguais, dans les unités de gestion et dans les périmètres d'action identifiés précédemment.

Sur les interactions : l'objectif est de comprendre avec quels acteurs et dans quelle arène de concertation/négociation l'institution interagit de manière privilégiée ou non, et notamment par rapport à des problématiques agricoles.

- Partenaires privilégiés, quelles interactions avec eux, dans quel cadre, sur quel financement.
- Partenaires non privilégiés, conflits ouverts ?

Pour la démarche de construction des scénarios

Présentation du principe des scénarios : peuvent être une combinaison de changements techniques (ex nouvelle culture, nouveau itinéraire technique), de changements organisationnels (ex : travail en commun, échange de matière entre exploitations) et finalement de changement de paramètres exogènes (par exemple le contexte réglementaire et les prix).

Pour aider à la formulation de ces changements, on peut imaginer trois types de changement :

- les changements souhaités par l'acteur
- les changements non souhaités
- les changements prévisibles ou pressentis par l'acteur

Pour les critères et indicateurs pour l'évaluation, et échelles.

- Quels sont les critères, indicateurs et variables actuellement utilisées pour évaluer l'atteinte des objectifs et missions de l'institution ? En particulier pour les performances et impacts de l'agriculture ? Quelles sont les données formalisées, leur mode d'acquisition et d'analyse ?
- Quels sont les critères et indicateurs souhaités pour évaluer les impacts des changements précédemment envisagés ? A quelles échelles doivent ces critères être calculés ? Quels sont les processus qu'il faut prendre en compte, en lien avec les changements imaginés et critères souhaités ?

Annexe B : Mise en forme et analyse de données spatialisées sous SIG : occupation du sol et caractérisation des sols camarguais

1. Mise en forme de données spatialisées d'occupation du sol

Des données d'occupation du sol ont été mises à disposition par différentes institutions en Camargue, via la signature de conventions :

- une cartographie de l'occupation du sol en 2006, réalisée par télédétection d'images satellite par le CEMAGREF et le SMCG pour le territoire de la Camargue Gardoise ;
- une cartographie de l'occupation du sol en 2006, réalisée à partir de photos aériennes par la Réserve Nationale et le PNRC pour les territoires du Plan du Bourg et la Grande Camargue.

Ces données n'étaient pas basées sur la même classification de l'usage du sol. Nous avons redéfini huit nouvelles classes d'occupation du sol pour synthétiser les données sur l'ensemble du territoire d'étude :

- 1 « boisement »
- 2 « prairie »
- 3 « culture annuelle »
- 4 « riz »
- 5 « verger »
- 6 « vigne »
- 7 « pâture extensive »
- 8 « milieu naturel »

La correspondance des anciennes classes avec les nouvelles est la suivante :

Occupation du sol du CEMAGREF et SMCG

Couche milieux_agricoles

- arbres dans milieux agricoles → 1
- friches, jachères, bords de chemin → 7
- haies → 1
- milieux agricoles avec végétation → 3
- milieux agricoles sans végétation → 3
- prairies → 2
- rizières → 4
- vergers → 5
- vignes → 6

Couche marais_salants

- bassins de préconcentration → 8
- tables saunantes → 8

Couche milieux_indéterminés

- non classé → 8
- végétation basse indéterminée → 7

Couche milieux_naturels

- eau avec végétation → 8
- prés salés → 7
- roselières → 8
- sansouires denses → 7

- sansouires ouvertes → 7
- Couche sols_nus
- sols_nus → 8

Occupation du sol de la Réserve Nationale et du PNR

Couche MA_OCSOL2006_CAMARGUE

- blé → 3
- colza → 3
- cultures fourragères → 2
- cultures maraîchères → 3
- friche ancienne → 7
- friche récente → 7
- luzerne → 3
- maïs → 3
- pré → 2
- riz → 4
- terres cultivées sans récolte → 3
- tournesol → 3
- verger → 5
- vigne → 6

Couche MN_OCSOL2006_CAMARGUE

- autres marais ... végétation immergée → 8
- boisement → 1
- boisement jeune ou dégradé → 1
- coussoul → 7
- dune → 8
- jonchaie → 7
- marais ouvert → 8
- marais ... marisque → 8
- pelouse → 7
- roselière → 8
- sansouire basse → 7
- sansouire haute → 7
- sol nu → 8
- étang → 8

Cependant, ces données ne couvraient pas l'ensemble du territoire de la réserve de Biosphère, du fait notamment de la récente extension de son périmètre (figure B-1).

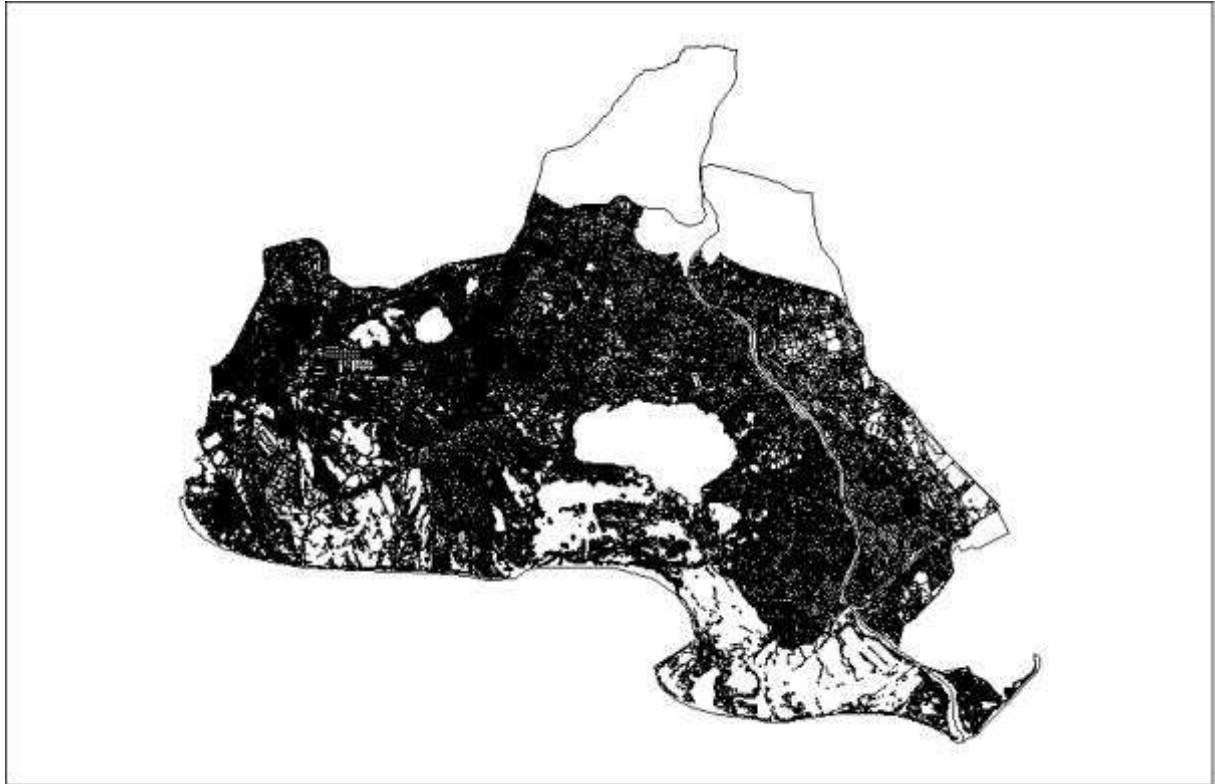


Figure B-1 : Polygones de la cartographie de l'usage du sol en Camargue. *Les parties noircies correspondent aux zones pour lesquelles nous disposons des données d'usage du sol en 2006 et des informations de texture et d'altitude. Les limites considérées pour l'analyse de ces données sont celles de la réserve de Biosphère, comme mentionnées dans le chapitre 4.*

2. Mise en forme de données spatialisées de caractérisation des types de sol

Des données de texture des sols ont été obtenues à partir de la base de données spatialisée INRA BDSOL³³ pour l'ensemble du territoire de la Camargue. Cette base de données géo-référencée contient une description des pédo-paysages, et notamment des informations sur la texture des sols, classées en 8 catégories :

- « » (vide, sans valeur)
- étangs
- sols argilo-limoneux et limoneux sableux
- sols sableux
- sols salés et alcalins
- sols sodiques et hydromorphes
- sols à galets
- zone urbaine

Cette base de données couvre l'intégralité de la région, c'est pourquoi les classes « vides », « étangs », « sols salés et alcalins » (correspondant aux marais salins d'Aigues Mortes et des

³³ Lien permanent : <http://sol.ensam.inra.fr/BdSoILR/Asp/Default.asp>

Salins de Giraud) et zones urbaines étaient incluses. Les données ont dans un premier temps été projetées en Lambert 2 étendu sous MapInfo®. Les polygones des sols agricoles ont été extraits de cette base de données. La figure B-2 représente les polygones présents dans la base de données pour chaque type de sol.

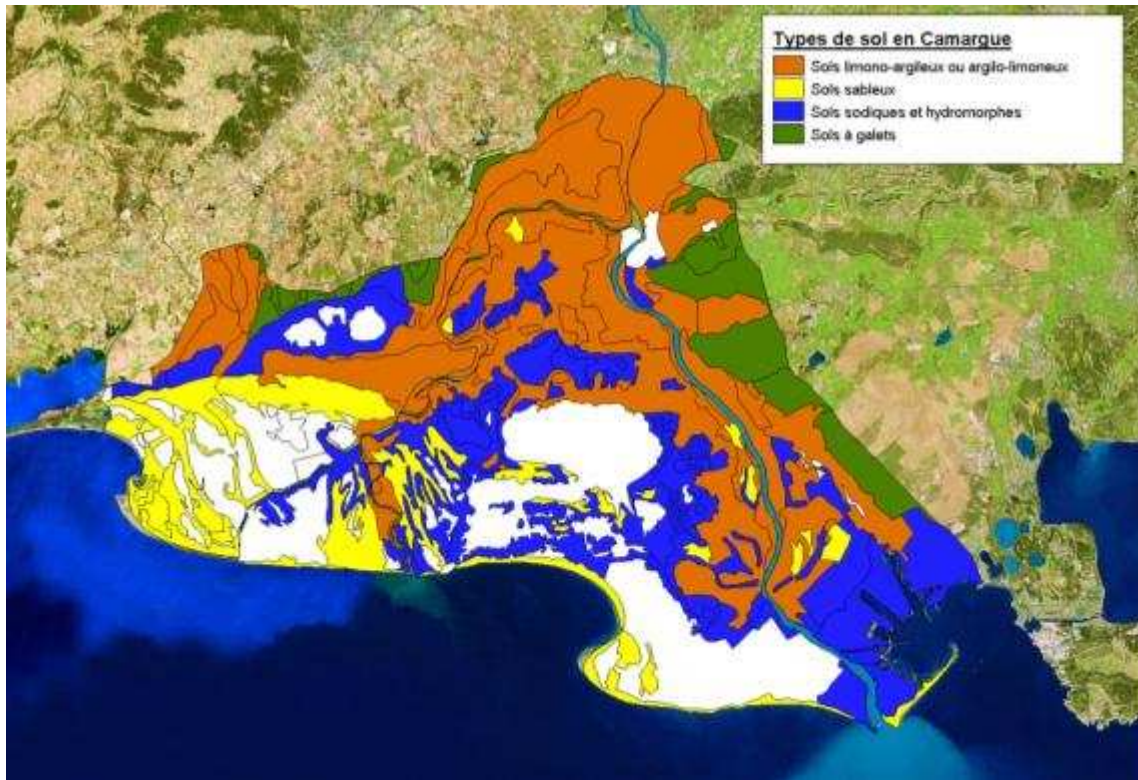


Figure B-2: Carte des types de sol camarguais. 4 types de sols sont distingués. Les limites utilisées pour cette carte correspondent aux limites de la réserve de Biosphère de Camargue.

Pour pouvoir s'approcher des surfaces réellement cultivées (extraire ainsi les surfaces de routes, chemins, canaux, forêts et bois, espaces naturels etc.), ces données de types de sol ont été croisées avec une base de données du parcellaire fournie par le Parc Naturel Régional de Camargue (données d'occupation du sol réalisées par la Réserve Nationale de Camargue à partir de photos aériennes en 2006) et des données d'occupation du sol (obtenue par télédétection d'images satellite de 2006) mises à disposition par le Syndicat Mixte de Gestion de la Camargue Gardoise (SMCG).

Le second facteur qui conditionne les performances agronomiques est l'altitude du sol en lien avec les phénomènes d'hydromorphie et de salinité. Aucune donnée n'était disponible à ce sujet, néanmoins ce facteur est étroitement lié en Camargue à l'altitude des terres. Deux sources de données de précision différentes ont été utilisées pour caractériser l'altitude des sols. Sur le territoire de la Camargue Gardoise, un modèle numérique de terrain était disponible et été mis à disposition par le SMCG. Pour la Grande Camargue et le Plan du Bourg, une carte d'altitude des sols avait été réalisée dans les années 1980 par le CNRS et celle-ci nous a été fournie par le PNRC. Les informations contenues dans ces deux bases de données ont été croisées avec les données de texture de sols obtenues lors des opérations précédentes. Il est couramment admis (Mouret, com. Pers) que les sols inférieurs à 1.5m d'altitude sont sujets à l'hydromorphie, ce seuil a donc été utilisé pour distinguer les terres hautes et les terres basses. Une nouvelle classification des sols a donc été réalisé:

- Sols sableux hauts (SH)
- Sols limono-argileux et argilo-limoneux hauts (AH)
- Sols argilo-limoneux bas (AB)
- Sols sodiques et hydromorphes bas (SB)

Les sols à galets ont été exclus de la classification des sols car il s'agit de terres quasiment exclusivement cultivées en prairies permanentes, qui ne sont pas considérées dans cette étude (voir chapitre 3).

Nous n'avons pu étendre cette classification à l'ensemble du territoire, ne disposant pas de données à l'échelle parcellaire d'usage du sol pour la partie nord de la Camargue Gardoise intégrée dans le périmètre du SAGE en 2010, ni pour la région située au nord d'Arles (voir Figure B-1).

Ces données ont été croisées à 250 analyses de sol disponibles dans la base de données issue du diagnostic agronomique réalisé par l'UMR Innovation. Ces 250 analyses ont été spatialisées manuellement, en repérant les parcelles sur lesquelles les expérimentations et suivis de culture avaient été conduits. Des analyses ont ensuite été réalisées par classe de sol précédemment identifiée pour vérifier la classification proposée et pour mesurer, au sein de chaque type, la variabilité de quelques caractéristiques des sols (granulométrie, matière organique, ...). La figure B-3 montre la répartition des sols sur le triangle des textures du GEPPA (1981). Dans l'analyse de ces données, Abdelkrim (2011) identifie de fortes différences de granulométrie au sein des sols camarguais, qui correspondent à la description réalisée dans la carte des sols de l'INRA : des sols argileux (surtout présent dans la classe AB), des sols argilo-limoneux (dans les classes SH, AH et SB), et des sols limoneux (majoritairement dans la classe AH). Les sols AH et les sols AB se distinguent en moyenne par une granulométrie plus argileuse, ce qui est cohérent avec les connaissances « expertes » sur le sujet. La classe des sols SH (sols profonds sableux) est celle qui semble la moins bien renseignée : elle contient des sols sableux ou sablo-limoneux et argilo-limoneux voir argileux. Cependant, ces sols sont les moins présents en terme de surface dans les exploitations rizicoles où les analyses ont été réalisées (peu de point d'analyse), les sols sableux étant principalement mis en valeur par de la vigne, des vergers et du maraîchage, en Camargue Gardoise notamment.

Ce travail de vérification de la cartographie et de caractérisation des sols a servi de base pour l'estimation des rendements, rapporté dans le chapitre 4 de cette thèse.

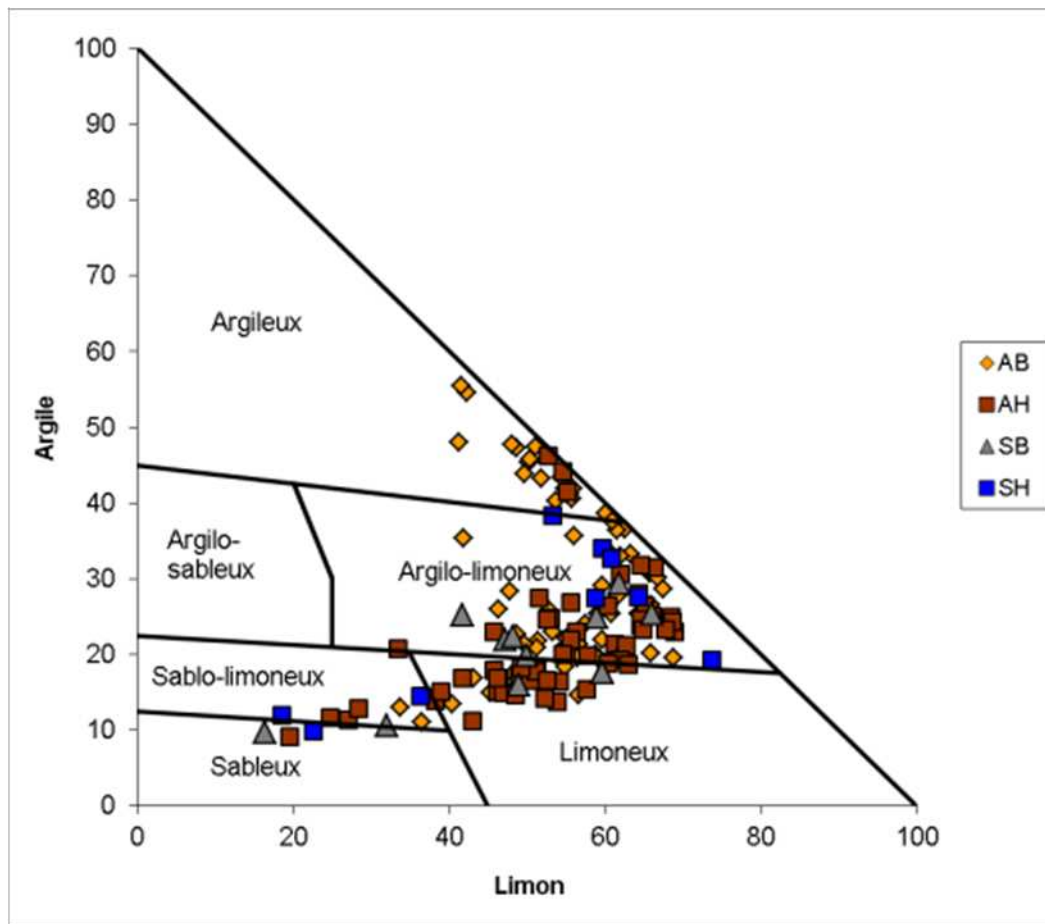


Figure B-3 : Identification des types de textures des 250 sols analysés. La forme du point indique le type de sol dans la cartographie de l'INRA (extrait de Abdelkrim, 2011).

Annexe C: Rapport sur la typologie des exploitations diffusé aux acteurs locaux camarguais.

Proposition d'une typologie des exploitations agricoles camarguaises

Gaël Goulevant et Sylvestre Delmotte – INRA UMR Innovation
2 place Pierre Viala 34070 Montpellier Cedex 2.
04 99 31 20 19 – delmotte@supagro.inra.fr

Janvier 2011

1 Introduction

Le projet Prospective Agricole Camargue consiste en l'élaboration et l'évaluation participative de scénarios d'évolution de l'agriculture en Camargue, et s'intéresse aux évolutions possibles à différentes échelles de l'exploitation jusqu'au territoire.

Dans ce cadre, pour agréger les changements à l'échelle de l'exploitation jusqu'à l'échelle du territoire, la méthodologie retenue consiste à utiliser une typologie des exploitations. Ceci nécessite d'avoir une connaissance exhaustive des exploitations de la région camarguaise, délimitée ici par le périmètre de la réserve de Biosphère de Camargue (UNESCO).

Le présent rapport a pour objectif de présenter les résultats d'un travail conduit depuis octobre 2010 et portant sur la proposition d'une typologie des exploitations agricoles axée sur l'orientation actuelle des exploitations en termes d'assolement et de mode de conduite.

Les hypothèses qui ont conduit à travailler sur ces critères pour la typologie sont directement liées à son usage prévu : la première hypothèse est que dans un futur proche, les évolutions de contexte (aide de la PAC, prix des productions, coûts des intrants) peuvent conduire à des évolutions drastiques de l'agriculture et de ses externalités (production, impacts sur l'économie et le développement du territoire, impacts sur l'environnement...). Ces évolutions peuvent se caractériser au niveau des exploitations agricoles par un changement d'orientation de la production et donc par des modifications de l'assolement de l'exploitation, ces changements d'assolement pouvant conduire à l'échelle du territoire à des modifications des externalités de l'agriculture. La seconde hypothèse est que les exploitants définissent leur mode de production (conventionnel et/ou biologique) en fonction de leurs objectifs et de leurs contraintes, à la fois bio-physiques et économiques. Pour appréhender des changements futurs de mode de production, il convient donc d'identifier ces contraintes et de classer les exploitations en fonction de leur mode de production actuel et de leurs contraintes et/ou objectifs par rapport à un changement de mode de production.

De nombreuses données ont été obtenues auprès de différents acteurs et partenaires. La première partie de ce rapport expose les données utilisées ainsi que la façon dont elles ont été analysées. La seconde partie présente les résultats de l'analyse et propose donc une typologie des exploitations camarguaises.

2 Matériel et méthodes

Les données qui ont été analysées sont issues des sources suivantes :

- Une enquête a été réalisée en 2007 par Robert Lifran & Mélanie Jaeck, Inra UMR Lameta, intitulée "Choix technico-économique et pratiques culturales dans la riziculture camarguaise".
- Le Registre Parcellaire Graphique édité par l'Agence de Service des paiements et mis à disposition de l'INRA pour les années 2006 à 2009.
- Une cartographie de l'occupation des sols en 2006 réalisée par le Syndicat Mixte de Gestion de la Camargue Gardoise et le CEMAGREF pour la Camargue Gardoise et la Réserve Nationale de Camargue pour le Plan du Bourg et la Grande Camargue
- Géoportail et Google Maps ont permis de localiser les exploitations de la plaine de Beaucaire
- L'Agence Bio publie sur son site un annuaire des agriculteurs certifiés en AB (déclaration obligatoire).
- Enfin, des communications personnelles ont permis de vérifier la cohérence des données (Jean-Claude Mouret & Roy Hammond, INRA, UMR innovation)

Dans les sections suivantes sont succinctement présentées les données ainsi que les analyses qui ont été conduites.

2.1 Enquête de 2007

L'enquête réalisée par l'équipe INRA UMR Lameta en 2007 a permis d'enquêter 104 gestionnaires d'exploitations rizicoles. Les principales variables disponibles dans cette enquête utilisées pour réaliser la typologie portent sur la structure de l'exploitation (surface totale, forme juridique, main d'œuvre, activités agricoles principales...) ainsi que sur l'assolement réalisé et la présence ou non de production en agriculture biologique.

Ces variables ont été analysées en utilisant différentes méthodes statistiques et en testant différentes hypothèses. Les résultats d'un arbre de classification et régression (CART) ont conduit à définir plusieurs types d'exploitations selon l'assolement, l'orientation de l'exploitation (bio ou non) et la présence d'élevage. Ces données décrivent bien les exploitations cultivant du riz mais n'est pas exhaustive de toutes les exploitations camarguaise.

2.2 Données RPG

Pour compléter les données de l'enquête évoquée ci-dessus, nous avons analysée les données du registre parcellaire graphique (RPG). Elles sont sous forme spatialisée et concernent l'ensemble du territoire camarguais. Ces données sont issues de deux départements (Gard et Bouches du Rhône). Des requêtes sous MapInfo® ont permis dans un premier temps d'extraire des deux départements toutes les exploitations (composées d'îlots au sens des déclarations des agriculteurs pour la Politique Agricole Commune) situées sur le territoire de la Réserve de Biosphère de Camargue. Les données sont disponibles par îlot, et les informations disponibles sont principalement un identifiant d'exploitation permettant de repérer les îlots d'une même exploitation, la culture de l'îlot codée dans une classification

avec 28 entrées et la surface de l'îlot. Les premiers calculs de surface à l'échelle de la région ont mis en évidence des imprécisions : le riz est parfois renseigné par le code 14 (« Riz ») ou par le code 28 (« Divers ») ce qui conduit à une surface à l'échelle de la région n'excédant pas la moitié de la surface communiquée par le Syndicat de Riziculteurs de France et Filières pour les années 2006 à 2009. De même le blé dur, seconde culture en terme de surface en Camargue est soit classée en « Divers » ou en « autres céréales ». Ceci peut être dû au choix réalisé en Camargue de définir des îlots de grandes tailles qui sont renseignés dans le RPG par une culture principale et non le détail des différentes cultures sur l'îlot (Claude Chailan, FranceAgriMer, com. Pers.).

Ces données concernant les cultures se révélant insuffisamment précises pour pouvoir caractériser chaque exploitation, nous avons choisi de ne travailler qu'avec les informations spatialisées de « périmètre » des exploitations et de croiser ces données sous SIG avec les données d'occupation du sol de 2006 dont nous disposons.

2.3 Données spatialisées d'occupation du sol en 2006, de type de sol et d'altitudes

Tous les 5 ans, le Syndicat Mixte de Gestion de la Camargue Gardoise (SMCG) et la Réserve Nationale de Camargue (RNC) réalisent une cartographie de l'occupation du sol en Camargue. En 2006 (dernière cartographie réalisée, la suivante est prévue en 2011), le SMCG avait utilisé des images satellites et la RNC des photos aériennes. Les données ont donc été homogénéisées, et fusionnées dans une base commune sous SIG. Le grain de base de cette base de données est la parcelle, le grain est donc plus fin que dans le RPG. A ces données ont été ajoutées des informations de type de sol issues d'une base de données INRA spatialisée des types de sol, ainsi qu'une information d'altitude (Modèle Numérique de Terrain, IGN, pour la Camargue gardoise, et relevés terrains cartographiés par le CNRS, pour l'île de Camargue et le plan du bourg).

Toutes ces données ont ensuite été croisées avec les données du RPG pour associer les parcelles de la base de données d'occupation du sol à une exploitation du RPG. Ceci nous a permis d'analyser par la suite les données d'occupation du sol par exploitation et de déterminer l'assolement en 2006 de chaque exploitation.

2.4 Croisement des trois sources de données précédentes

L'ensemble des données mises en forme et analysées selon les méthodes présentées précédemment ont été rapprochées. Toutes les exploitations de l'enquête ont été repérées dans la base de données croisées RPG-Occupation du sol 2006, ce qui a permis d'identifier les exploitations pour lesquelles nous ne disposons pas du type. Les exploitations agricoles ne produisant pas de riz ont été rajoutées pour compléter l'analyse. Toutes les exploitations ont donc eu un type attribué en fonction de l'assolement en 2006. Les exploitations de la plaine de Beaucaire-Fourques, hors de la zone cartographiée par le SMCG et la RNC, ont été caractérisées avec les données du RPG et des images satellites (Google Maps et Géoportail). La présence d'élevage a été visualisée sur des images satellites.

Pour compléter les types concernant le critère de mode de production, l'Agence Bio fournit sur son site internet l'adresse et le nom de tous les agriculteurs biologiques. Chaque exploitation biologique a été identifiée. Une cartographie des exploitations en fonction des types a été produite, et confrontée à des experts de l'agriculture en Camargue afin de vérifier la cohérence des résultats.

3 Résultats

3.1 Proposition d'une typologie

L'analyse des données d'enquête a permis de définir dix types d'exploitations cultivant du riz. Cette classification est basée sur l'assolement, ainsi que sur la présence de bio dans l'exploitation. Les groupes les plus importants ont été subdivisés en deux (exploitations moyennes et grandes exploitations à respectivement 3/4 - 1/4 de l'effectif du groupe initial selon la SAU de l'exploitation). Ces exploitations représentent 30 000 ha de superficie. En ajoutant à l'analyse toutes les exploitations du RPG dont l'assolement a donc été décrit en utilisant les données d'occupation du sol en 2006, nous obtenons ainsi une typologie des exploitations qui comptent 15 types différents. Ces types sont décrits succinctement ci-dessous et la proportion de chaque type dans la population d'exploitation ainsi que la proportion de surface concernée à l'échelle de la région par chaque type sont décrits dans le tableau 1 :

- **riziculteurs de moyenne SAU,**
 - o 82% de riz, 15% de blé dur, environ 126 ha, non bio, non éleveur
- **riziculteurs de grande SAU,**
 - o 77% de riz, 15% de blé dur, environ 425 ha, non bio, non éleveur
- **riziculteurs « céréaliers » de moyenne SAU,**
 - o 62% de riz, 33% de blé dur, environ 140 ha, non bio, non éleveur
- **riziculteurs « céréaliers » de grande SAU,**
 - o 62% de riz, 34% de blé dur, environ 435 ha, non bio, non éleveur
- **riziculteurs « céréaliers » en bio partiel,**
 - o 64% de riz, 26% de blé dur, environ 420 ha, bio partiel à 21% de la SAU, non éleveur, 22% de la SAU bio de Camargue
- **éleveurs 100% bio,**
 - o 10% de riz, 17% de blé, 50% de fourrages, environ 350ha, éleveur bovin, 50% de la SAU bio de Camargue
- **éleveurs bio partiel,**
 - o 36% de riz, 17% de blé, 42% de fourrages, environ 300ha, bio partiel à 43% de la SAU, éleveur bovin, 13,5% de la SAU bio de Camargue
- **éleveurs non bio,**
 - o 35% de riz, 34% de blé, 24% de fourrages, environ 260ha, éleveur bovin
- **Céréaliers 100% bio,**
 - o 33% de riz, 46% de blé, 9% de fourrages, 7% d'oléagineux, environ 94ha, non éleveur, 13,5% de la SAU bio de Camargue
- **céréaliers diversifiés,**
 - o 27% de riz, 56% de blé, 9% d'oléagineux, environ 190ha, non bio, non éleveur
- **les céréaliers sans riz (bio ou non)**
 - o pas de riz, pas d'élevage
- **les éleveurs sans riz**
 - o pas de riz dans l'assolement, présence de cultures (minimum 5% de la superficie cultivée incluant fourrages)
- **les éleveurs extensifs (bio ou non)**
 - o aucune culture
- **les viticulteurs (bio ou non)**

- pas de riz (ou <10% de la SAU : 6 exploitations, 200 ha de riz au total), au moins 20% de la SAU en vigne
- **les maraîchers-arboriculteurs (bio ou non)**
 - pas de riz, au moins 25% de la SAU en maraîchage et/ou vergers

Dans les paragraphes suivants sont proposés des analyses descriptives détaillant les différents types proposés.

3.2 Analyse descriptive des types d'exploitations

La superficie totale des exploitations faisant l'objet d'une déclaration PAC dans la zone de la Réserve de Biosphère de Camargue est d'environ 80 000 ha. Le RPG compte 612 exploitations (sont exclues les exploitations dont une faible part des surfaces est sur le territoire de la Réserve de Biosphère). 138 de ces exploitations ont une surface inférieure à 25ha, soit 22,5% des exploitations mais seulement 1,8% de la superficie (soit 1400 ha).

Nous avons choisi de ne pas retenir les exploitations inférieures à 25 ha dans l'élaboration de la typologie, du fait de l'objectif de celle-ci. Pour d'autres travaux, il pourrait au contraire être opportun de s'intéresser en particulier à ces petites exploitations, notamment en termes d'emploi ou de pluriactivité. L'analyse a donc été effectuée sur 474 exploitations. Le nombre d'exploitants semble légèrement inférieur, traduisant le fait que plusieurs exploitations peuvent être gérées par un seul exploitant. Pour les exploitations qui avait été enquêtées, nous disposons de l'information et avons donc pu les regrouper. Une fois les regroupements effectués, 466 exploitations ont une superficie supérieure à 25 ha sur le territoire de la Réserve de Biosphère (Tableau 1).

186 exploitations sont identifiées avec une culture de riz ce qui représente 40% des exploitations de plus de 25ha et 55% de la superficie agricole. Le reste de la superficie est largement occupé par des éleveurs extensifs (22,5%) et des éleveurs sans riz (10%). Les céréaliers sans riz ne représentent que 4% de la superficie malgré un effectif en nombre d'exploitations de 8,6%.

	Groupes	% Exploitation % Superficie	100% Bio	Bio Partiel	Non Bio	
Avec riz	Riziculteurs	12,2% 17,4%	0%	3,0%]25;265 ha] 8,6% - 7,6%]265;1000ha] 2,1% - 6,2%
	Riziculteurs céréaliers	10,1% 15,3%	0%	8,1%]25;276 ha] 6,9% - 6,3%]276;1101 ha] 1,7% - 4,5%
40% 55%	Eleveurs	6,9% 13,2%	1,9% 3,0%	2,1% 4,6%	2,8% 5,7%	
	Céréaliers diversifiés	10,7% 9,3%	1,1% 0,8%	0,6% 0,7%	9,0% 7,9%	
Sans riz	Céréaliers sans riz	8,8% 4,0%	0%		8,8% 4,0%	
	Eleveurs sans riz	10,1% 9,9%	0%		10,1% 9,9%	
	Eleveurs extensifs	18,1% 22,5%	0,9% 3,9%		17,6% 18,6%	
	Viticulteurs	16,1% 6,5%	1,9% 1%		14,2% 5,5%	
	Maraîchers arboriculteurs	6,7% 2,0%	0,4% 0,1%		6,2% 1,8%	

Tableau 1 : Types d'exploitations, % des exploitations concernées et % des surfaces concernées sur l'ensemble de la Réserve de Biosphère.

Superficie des types

Le RPG comporte l'information relative à la superficie des exploitations. Dans le cas de la Camargue, cette superficie n'est pas la Surface Agricole Utile (SAU). En effet les îlots déclarés sont des blocs de parcelles (construits pour la culture de riz) contenant aussi les roubines, les chemins, les fossés, les roselières, les haies... Cette superficie tient aussi souvent compte des terres non cultivées et non productives (milieux naturels tels les sansouires, les marais et les friches).

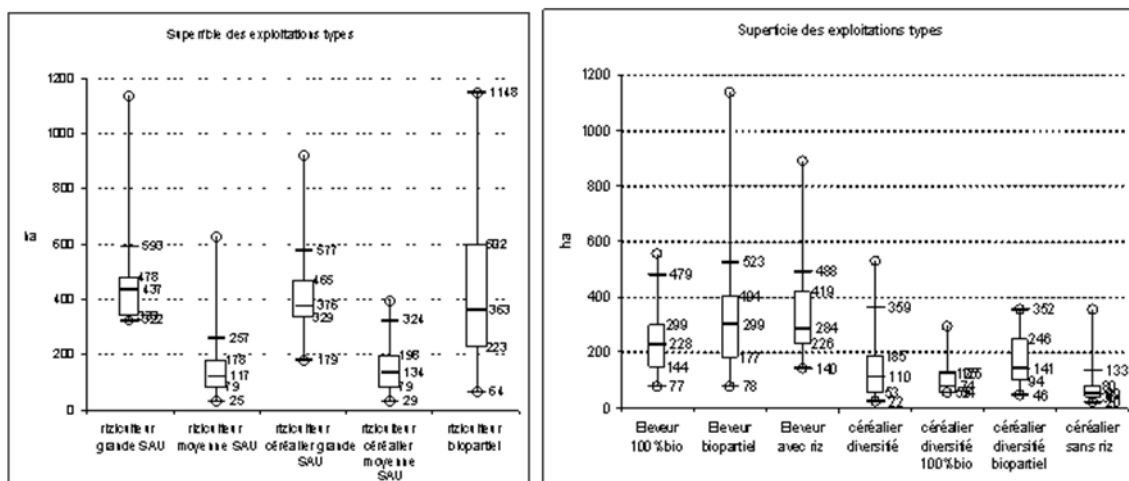


Figure 1 : Box-plot des superficies des types d'exploitations cultivant du riz (sauf le dernier type « céréalière sans riz »). Les points les plus bas et plus haut représentent le minimum et maximum respectivement, la limite inférieure du rectangle représente le premier quartile, la limite supérieure le troisième quartile et le trait épais horizontal dans le rectangle, la médiane.

Les grandes exploitations (riziculteurs et riziculteurs céréalières) ont une superficie supérieure à 320 ha (Figure 1). La taille médiane est de 437 et 376 ha respectivement pour les riziculteurs et riziculteurs céréalières. Les exploitations moyennes (riziculteurs et riziculteurs céréalières) ont une superficie médiane de 117 et 134 ha respectivement. Certaines exploitations dépassent le seuil des 320 ha mais leur SAU reste inférieure aux critères de la typologie (<265 ha et <276 ha de cultures). Les superficies supplémentaires sont des terres non cultivées (marais et friches, information issues des enquêtes).

Les riziculteurs et riziculteurs céréalières regroupés pour le bio partiel sont plutôt de grandes exploitations. 50% du groupe se situe entre 223 et 602 ha. Les éleveurs avec riz ont aussi des grandes exploitations avec respectivement une médiane de 284 ha, 299 ha et 228 ha pour les non bio, bio partiel et 100% bio. Les 100% bio semblent légèrement plus petits que les non bio et bio partiel. Les céréalières diversifiées ont des exploitations moyennes similaires aux riziculteurs et riziculteurs céréalières moyens avec une médiane de 110ha. Les 100% bio semblent de plus petites tailles (médiane de 74 ha). Il est difficile de conclure pour les 3 exploitations céréalières diversifiées partiellement biologiques du fait du faible effectif du groupe. Les exploitations céréalières sans riz sont de petites tailles avec une médiane de 49 ha. Les éleveurs sans riz et les éleveurs extensifs ont des tailles d'exploitations très variables. Il y a une proportion importante de grandes exploitations d'élevage extensifs (21 exploitations >232 ha).

Les viticulteurs ont des exploitations dont la taille médiane est 55 ha (figure 2). La plus grosse exploitation viticole est de 281 ha avec 200 ha de vignes mais les trois quarts ne dépassent pas 96 ha. Le nombre de ces exploitations est sous évalué dans la zone car beaucoup de parcelles de vigne ne sont pas dans le RPG (nord de la plaine de Beaucaire et route d'Aigues-Morte à Sylvéreal).

Les maraîchers et arboriculteurs ont les plus petites exploitations avec une médiane de 32 ha. Le nombre de ces exploitations doit être sous-évalué car beaucoup d'exploitations de ce type sont en dehors du RPG (pas de déclaration PAC). Beaucoup de serres et vergers en dehors du RPG sont visibles par Géoportail (nord de la plaine de Beaucaire, sud d'Arles).

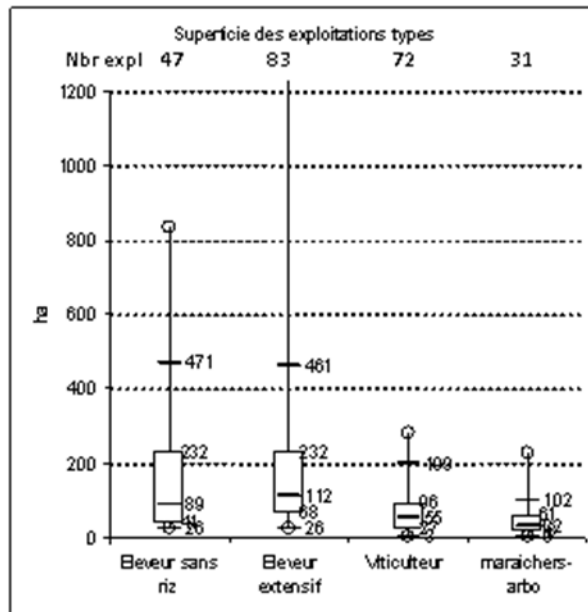


Figure 2 : Box-plot des superficies des exploitations non rizicoles, et nombre d'exploitations de chaque type.

Part de la surface rizicultivée par types (enquête 2007+ zone d'occupation des sols 2006)

Les données de l'enquête 2007 sont les plus précises en ce qui concerne l'assolement. A ces données, on rajoute les valeurs d'assolement données par le croisement des périmètres des exploitations et de l'occupation des sols de 2006 pour les autres exploitations rizicoles identifiées et typées. Ainsi aux 104 exploitations couvrant 30 000 ha avec 12500 ha de riz, on rajoute 61 exploitations d'un total de 8730 ha faisant 4550 ha de riz.

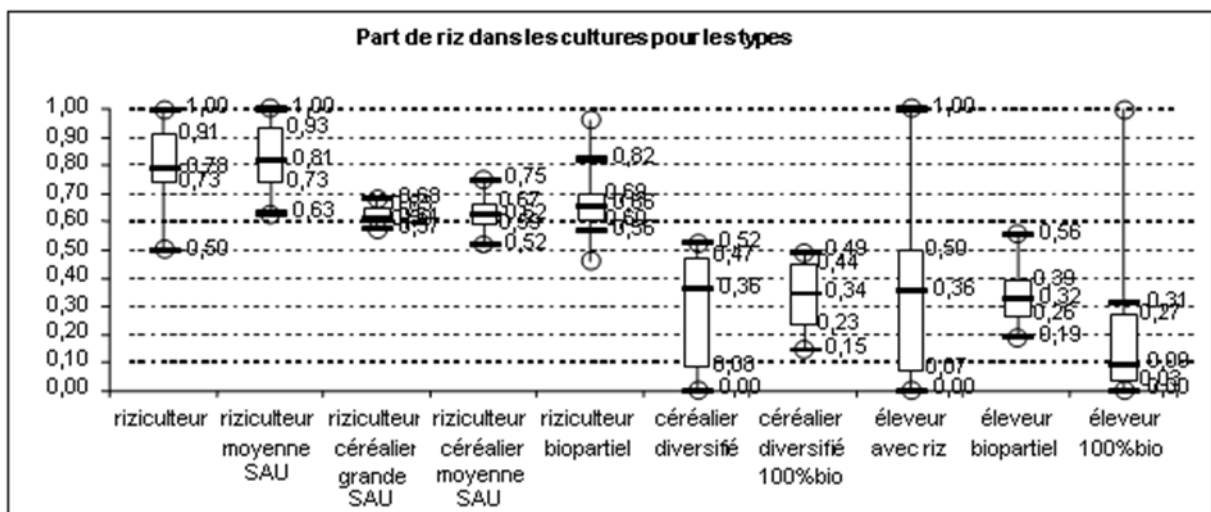


Figure 3 : Box-plot des proportions de riz dans chaque type d'exploitations cultivant du riz et nombre d'exploitations de chaque type.

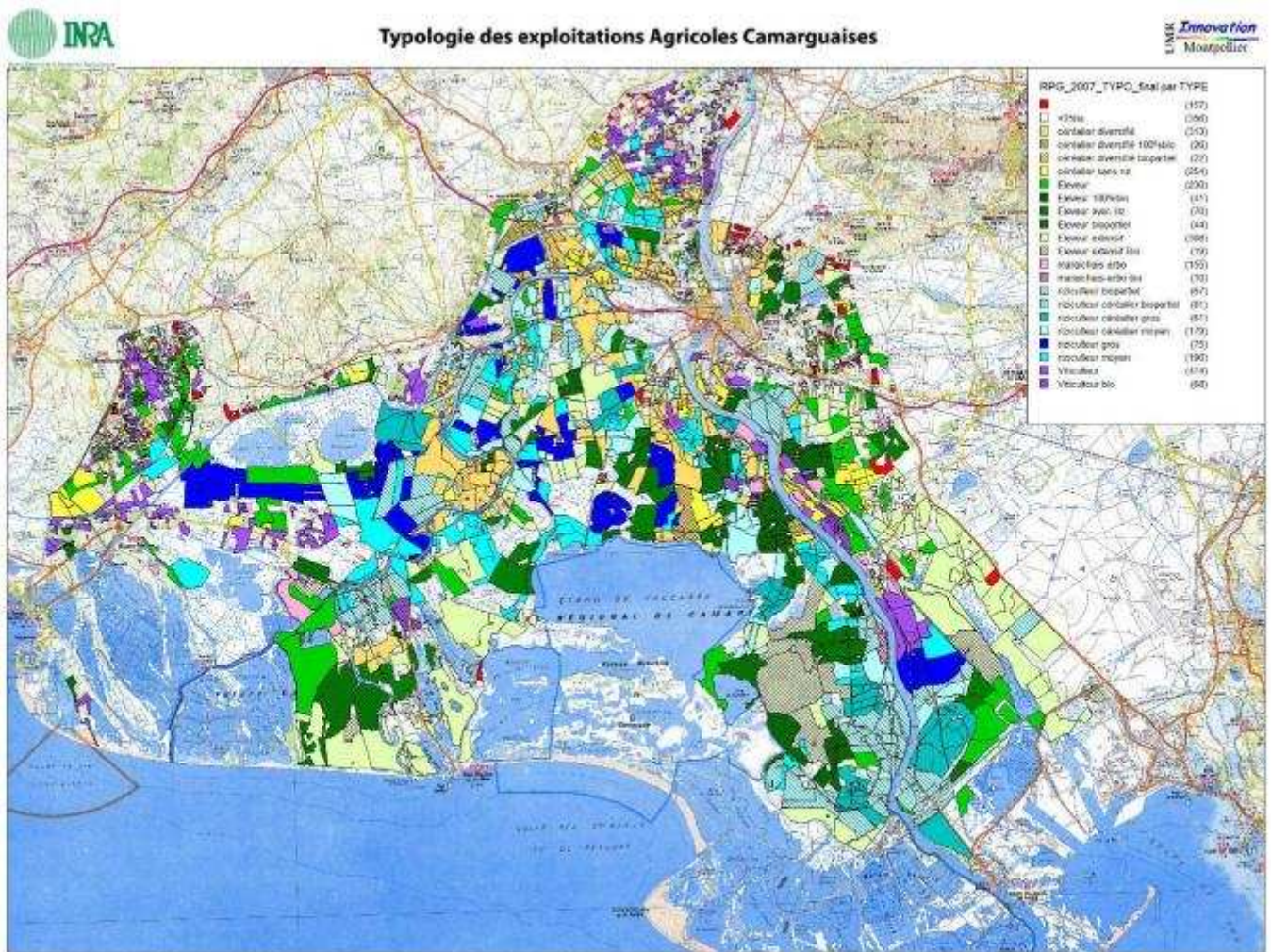
Les valeurs de part de riz extrêmes pour les riziculteurs sont issus de la classification CART qui a séparé ce types des riziculteurs céréalières par une part de blé <25%. Les riziculteurs

biopartiels ont une part de riz similaire aux riziculteurs céréaliers avec un peu plus de dispersion.

Deux éleveurs ont une part de riz de 100% dans leurs cultures. Mais ces surfaces sont à comparer avec la surface de STH et friche. Il est possible qu'il y ait une rotation entre le riz et une partie de ces surfaces "non cultivées". Les autres ont une proportion de riz équivalente aux céréaliers diversifiés. Les éleveurs 100% bio ont généralement moins de riz.

4 Cartographie des types d'exploitations

La carte présente l'ensemble des exploitations situées dans la Réserve Nationale de Camargue en fonction de leur type.



Conclusion

La typologie présentée ici croise un grand nombre de données, qui ne sont pas toutes datées de la même année. Son utilisation doit donc toujours bien prendre en compte qu'il existe des incertitudes pour certaines exploitations qui pourraient avoir évoluées de manière importante depuis l'enquête de 2007 ou dont l'assolement pourrait avoir beaucoup changé depuis la dernière cartographie de l'occupation du sol en Camargue de 2006.

Il est prévu en 2011 de procéder à une nouvelle cartographie de l'usage du sol en Camargue dans le cadre de l'observatoire Camargue de la Réserve de Biosphère, il pourrait être opportun une fois ces données disponibles de remettre à jour cette typologie. Une comparaison de la typologie 2006/2007 et d'une typologie 2011 pourrait permettre une analyse des trajectoires de changement et d'innovation des exploitations.

Ce travail sera poursuivi d'une part par l'analyse des itinéraires techniques de fertilisation et de traitements du riz par type, pour mettre en évidence d'éventuelles différences de pratiques en fonction du type d'exploitation, et d'autre part par un travail de conception et d'évaluation de scénarios d'évolution de l'agriculture dans la région.

Remerciements

Ce travail de typologie a mobilisé beaucoup de données issues de différents travaux conduits par des partenaires que nous tenons ici à remercier sincèrement pour la collaboration que nous avons eue. Nous tenons à remercier ici particulièrement Robert Lifran et Mélanie Jaeck de nous avoir mis à disposition leurs données ainsi que pour les discussions fructueuses que nous avons et avons eu à ce sujet. Nous tenons également à remercier Bertrand Chaussat qui nous a accompagné pendant un peu plus de deux mois dans la gestion des bases de données SIG, ainsi que tous les partenaires qui nous ont gracieusement mis à disposition leurs données : le Syndicat Mixte de Gestion de la Camargue Gardoise, la Réserve Nationale de Camargue et le Parc Naturel Régional de Camargue. Nous remercions Eric Cahuzac de l'INRA de Toulouse pour nous avoir à disposition dans un temps record les données du RPG après que l'INRA les ait eu réceptionnées.

Enfin, un grand merci à Jean-Claude Mouret et Roy Hammond pour leur conseil et expertise sur les exploitations camarguaises.

Annexe D : Calcul des coûts de mécanisation, d'irrigation et d'assainissement.

Deux coefficients techniques ont nécessité une procédure d'acquisition de données ou de calcul particulière. Cette annexe présente premièrement dans le tableau D-1 quelques exemples de calcul de coûts de mécanisation. Puis, le calcul des coûts de l'eau (irrigation et assainissement) en ASA est détaillé.

Tableau D-1 : Exemple de calcul de coûts de mécanisation pour sept exploitations types différentes et pour deux niveaux d'usage d'intrants différents.

Type	Surface agricole utile (ha)	Usage d'intrant	Coûts de mécanisation de l'activité						
			Riz/riz	Riz/Blé	Riz/lentille	Riz/luzerne	Riz/Soja	Blé/Riz	Blé/Blé
Riziculteur	126	Intensif	493€	493€				360€	371€
Riziculteur	425	Intensif	425€	392€				336€	343€
Riziculteur céréaliier	140	Intensif	488€	452€				331€	342€
Riziculteur céréaliier	435	Intensif	429€	390€				334€	341€
Eleveur	230	Intensif	477€	465€		432€		309€	321€
Céréaliier diversifié	147	Intensif		518€	510€			335€	348€
Céréaliier diversifié	147	Intensif		511€			504€	330€	343€
Riziculteur	126	Simplifié	485€	497€				342€	354€
Riziculteur	425	Simplifié	421€	395€				325€	333€
Riziculteur céréaliier	140	Simplifié	486€	461€				315€	328€
Riziculteur céréaliier	435	Simplifié	426€	393€				325€	331€
Eleveur	230	Simplifié	477€	477€		445€		292€	308€
Céréaliier diversifié	147	Simplifié		526€	526€			317€	334€
Céréaliier diversifié	147	Simplifié		521€			521€	311€	330€
		moyenne	461€	464€	518€	439€	513€	326€	338€

Calcul des coûts d'irrigation et d'assainissement

En Camargue, les agriculteurs utilisent deux types de canaux : des canaux d'irrigation, qui amènent l'eau du Rhône jusqu'à l'entrée des parcelles par gravité, et des canaux d'assainissement (ou de drainage) qui récupèrent les eaux de drainage des parcelles rizicoles et les évacuent soit vers le Rhône via un pompage, soit vers les étangs centraux de la Camargue. La gestion et l'entretien de ces canaux, ainsi que le pompage de l'eau sont souvent assurés de manière collective par des Associations Syndicales Autorisées dont les agriculteurs sont membres. Certains agriculteurs, notamment ceux situés en bordure du Rhône, peuvent avoir des systèmes de pompage indépendants. Les coûts de ces activités sont complexes à calculer dans le détail, du fait que suivant les exploitations, les agriculteurs peuvent adhérer à une ou plusieurs ASA, avoir leur propre pompe, ou les deux. A l'échelle d'une ASA, les coûts sont néanmoins partagés entre les agriculteurs en fonction de la mise en valeur des terres. Aucune donnée n'étant disponible pour estimer le coût de l'eau dans le cas de stations de pompage privée, nous avons pris contact avec le Syndicat Mixte des ASA qui nous a mis à disposition les déclarations de chaque agriculteur concernant les mises en cultures, ainsi que les bilans économiques des ASA d'irrigation et d'assainissement.

Cependant, si certaines ASA facturent l'eau par hectare, d'autres fonctionnent avec des systèmes de points ou de revenus cadastraux. De plus, les « rôles » (montant à payer par hectare) peuvent être composés d'une partie fixe (dit rôle ordinaire) et d'une partie variable qui dépend de la culture (dit rôle d'exploitation). A partir des surfaces déclarées par les agriculteurs et des bilans financiers des ASA, nous avons pu calculer pour la majorité des ASA les rôles d'irrigation et d'assainissement par hectare pour le riz, mais aussi pour les autres cultures irriguées (telles que le maïs ou la prairie). Finalement, pour simplifier, nous avons calculé une moyenne des coûts pour chacune des cultures. Le tableau D-2 récapitule les rôles que nous avons pu calculer pour chaque ASA, pour le riz et les céréales.

Tableau D-2 : Montant des rôles ordinaires et d'exploitation pour toutes les ASA camarguaises. CG : Camargue Gardoise, Gcam : Grande Camargue, PdB : Plan du Bourg, Ass : Assainissement, irr : irrigation

Sous-région	ASA	Type	Rôle fixe/ordinaire (€/ha)	Rôle exploitation riz sans faux semis (€/ha)	Rôle exploitation riz faux semis (€/ha)	Rôle exploitation céréales (€/ha)	Rôle exploitation prairie (€/ha)	Rôle exploitation luzerne (€/ha)
CG	ASA du couloir de Saint-Gilles	ass	9.6	18.9	18.9			
CG	ASA des marais de la Fosse	ass	10.7					
CG	ASA de la Souteyranne	ass	15.3					
CG	ASA du Môle	ass						
Gcam	Egout de Roquemaure	ass	6.8					
Gcam	Egout du Mas de Thor	ass	7.0					
Gcam	Egout de Meyran Praredon	ass	4.0	9.1	9.1			
Gcam	AS Remembrement Mas Thibert	ass	79.0					
Gcam	Roubine Grande Montlong	ass	8.5					
Gcam	Vidanges de Correge Camargue Major	ass	10.4					
Gcam	Assainissement des Stes-Maries-de-la-Mer	ass	3.7					
Gcam	Avergues de Gimeaux	ass	7.7					
Gcam	Benevent Egout Fosse Salie	ass	1.8					
Gcam	Canal de Fumemorte	ass	6.4					
Gcam	Segonnaux nord arles trebon	ass	7.8					
PdB	Grand Trébon	ass	25.6					
PdB	Petit Trébon	ass	66.0					
PdB	la Calade	ass	40.8					
PdB	la Pourride	ass	22.2					
PdB	Bas Mouleyres	ass	7.5					
PdB	Haut Plan du Bourg	ass	11.2					
PdB	Meyranne	ass						
PdB	Mas Thibert	ass	18.6					
PdB	Champtercier	ass	11.2					
Gcam	Canal de la Sigoulette	ass	3.2	18.8	18.8	12	8.45	8.45
CG	ASA de Capette	ass/irr	2.3	19.1	19.1			
CG	ASA du Bourgidou	ass/irr		95.7	95.7	41.89	23.93	23.93
CG	ASA du Cougourlier	ass/irr	31.5	42.1	42.1			
Gcam	Canal du japon	ass/irr	13.7					
Gcam	ASA Grand Plan du Bourg	ass/irr	2.5	4.1	4.1	1.23	1.46	
CG	ASA de Canavère	irr	34.2	24.8	24.8			
CG	ASA des Aurillasses	irr	68.6	48.6	48.6		9.45	9.45
CG	ASA de l'Esperance	irr	68.3	92.9	92.9	92.92	92.92	92.92
Gcam	Aube de bouic	irr	55.0	95.4	105.4			
Gcam	Canal en relief grande montlong	irr	45.0	120.0	125.0		35	
Gcam	Roubine de gimeaux	irr	32.0	121.7	121.7	30.29		
Gcam	Roubine de la triquette	irr	10.0	121.7	121.7	30.29		
Gcam	Arrosants Saliers	irr	56.0	102.5	102.5		51.22	
Gcam	Canal relief du Sambuc	irr		147.5	147.5			
Gcam	Irrigation petite montlong	irr	33.8	148.1	148.1	21.18	63.53	42.35
Gcam	Mas de vert	irr	32.9	103.1	103.1			
Gcam	Arrosants prise Petit Beaumont	irr		80				
Gcam	Pioch figoule grazier	irr	38.3				51.39	51.39
Gcam	St-Césaire Saliers	irr	36.0	89	89		23.63	
Gcam	Clos de la Vigne	irr	41.7					
PdB	Remembrement Mas Thibert	irr	77.9	120	120			
PdB	Bras Mort	irr	53.2	130	130			
PdB	Petit plan du bourg	irr	239.4					

Annexe E : Fiches récapitulatives des coefficients techniques calculés pour chaque activité.

Ces fiches ont été distribuées aux agriculteurs pour les séances de simulation interactives, ainsi qu'aux acteurs pour les évaluations de scénarios avec le modèle bioéconomique.

Description quantitative des activités agricoles en Camargue

S. Delmotte, G. Goulevant, L. Le Quéré,

INRA, UMR Innovation,

2 place Pierre Viala 34070 Montpellier Cedex 2.

04 99 61 20 19 – delmotte@supagro.inra.fr

Contexte et objectifs

- **Projet Prospective Agricole Camargue:** participer à la mise en œuvre d'une réflexion en Camargue sur les questions préoccupantes de l'avenir de l'agriculture avec les acteurs locaux.
- **Proposition d'un outil** permettant la construction et l'évaluation de scénarios avec les acteurs locaux, notamment basé sur une description fine des activités agricoles en Camargue.
 - Objectif de ce document : présenter les résultats de la description quantitative des activités agricoles

Méthodologie

- Plus de 25 enquêtes en Camargue, entre 2003 et 2010
 - Vérification et compléments avec Arvalis et CA 13
 - Usage de différentes brochures et statistiques régionales

 - Coûts de mécanisation en utilisant un logiciel d'Arvalis (Competilis®) basé sur le BCMA
 - Prix des intrants issus des fournisseurs camarguais

 - Rendement du riz évalué à partir de plus de 350 situations en Camargue sur les 15 dernières années
 - Rendement du blé et autres cultures par Arvalis et CA 13.
- Résultats encore à valider (n'hésitez pas à nous faire part de vos remarques!)

Riz Conventionnel Piloté

Résumé de la culture

Culture	Riz									
	Conventionnel									
	Piloté									
Précédent	Riz	Blé	Luzerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Maïs	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	9,5	8,6	7,8	8,5	8,3	8,8	8,8	7,8	7,8	7,8
Coût total main d'oeuvre (base 12€/h) (€/ha)	113,4	105	93	102	99	105	105	93	93	93
Coût intrants (€/ha)	796	716	541	716	716	716	716	541	541	541
Coûts mécanisation (€/ha)	461	464	439	464	464	464	464	518	513	464
Coûts de feu (€/ha)	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154
Total coûts de production	1485	1439	1227	1436	1433	1439	1439	1306	1301	1252
IFT	4	3	3	3	3	3	3	3	3	3

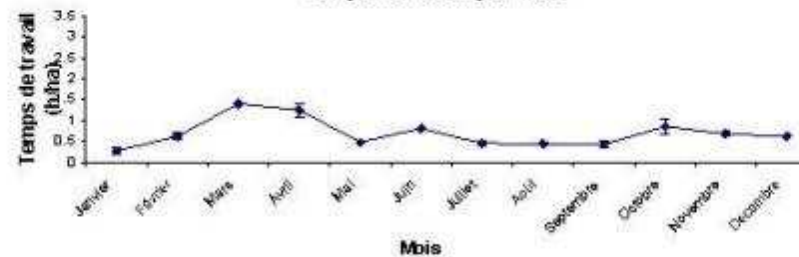
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	169	158	145	158	147	158	158	145	145	145
Coût total carburant (base 0,6 €/L) (€/ha)	101	95	87	95	88	95	95	87	87	87
Coût total des fertilisants (€/ha)	255	255	80	255	255	255	255	80	80	80
Coût total des pesticides (€/ha)	370	330	330	330	330	330	330	330	330	330

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	5,5	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Sol limono-argileux haut	6,0	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
Sol argileux bas	6,0	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5	6,5
Sol salé et hydromorphe	6,0	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	240									
Marge Brute Sol sableux	-165									
Marge Brute Sol limono-argileux haut	-45	121	213	4	7	1	1	134	139	188
Marge Brute Sol argileux bas	-45	121	333	124	127	121	121	254	259	308
Marge Brute Sol salé et hydromorphe	-45	-359	-147	-356	-353	-359	-359	-226	-221	-172

Riz Conventionnel Simplifié

Résumé de la culture

Culture	Riz									
	Conventionnel									
	Simplifié									
Précédent	Riz	Blé	Lucerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Mais	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	6.7	7.9	7.3	8.0	7.8	8.3	8.3	7.3	7.3	7.3
Coût total main d'œuvre (base 12€/h) (€/ha)	80.25	94.5	87	96	93	99	99	87	87	87
Coût intrants (€/ha)	576	576	401	576	576	576	576	401	401	401
Coûts mécanisation (€/ha)	461	464	439	464	464	464	464	518	513	464
Coûts de l'eau (€/ha)	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154
Total coûts de production	1271	1289	1081	1290	1287	1293	1293	1160	1155	1106
IFT	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

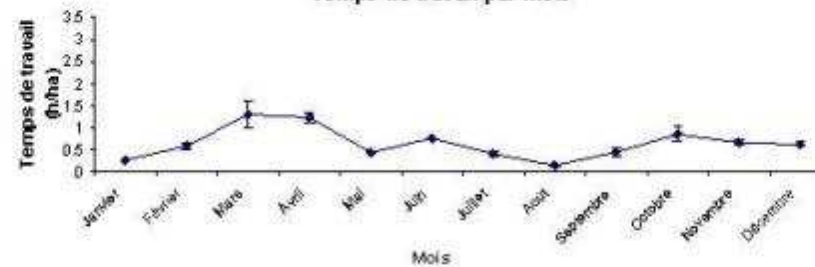
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (l/ha)	123	145	143	156	145	156	156	143	143	143
Coût total carburant (base 0.6 €/L) (€/ha)	74	87	86	94	87	94	94	86	86	86
Coût total des fertilisants (€/ha)	255	255	80	255	255	255	255	80	80	80
Coût total des pesticides (€/ha)	190	190	190	190	190	190	190	190	190	190

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	4.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0	6.0
Sol limono-argileux haut	4.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
Sol argileux bas	4.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5	6.5
Sol salé et hydromorphe	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5	4.5

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€t)	240									
Marge Brute Sol sableux	-311	151	359	150	153	147	147	280	285	334
Marge Brute Sol limono-argileux haut	-191	271	479	270	273	267	267	400	405	454
Marge Brute Sol argileux bas	-191	271	479	270	273	267	267	400	405	454
Marge Brute Sol salé et hydromorphe	-191	-209	-1	-210	-207	-213	-213	-80	-75	-26

Riz Biologique

Résumé de la culture

Culture	Riz									
Mode de conduite	Biologique									
Pilotage										
Précédent	Riz	Blé	Luzeerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Maïs	Lentille	Sois	Prairie
Temps travail total (h/ha)	8,0	7,5	6,8	7,8	8,0	8,0	8,0	7,3	7,3	6,8
Coût total main d'oeuvre (base 12€/h) (€/ha)	95,4	91,5	81	93	96	96	96	87	87	81
Coût intrants (€/ha)	629	629	379	629	629	629	629	379	379	379
Coûts mécanisation (€/ha)	458	458	446	458	458	458	458	479	498	458
Coûts de l'eau (€/ha)	154	154	154	154	154	154	154	154	154	154
Total coûts de production	1336	1332	1060	1334	1337	1337	1337	1099	1118	1072
IFT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

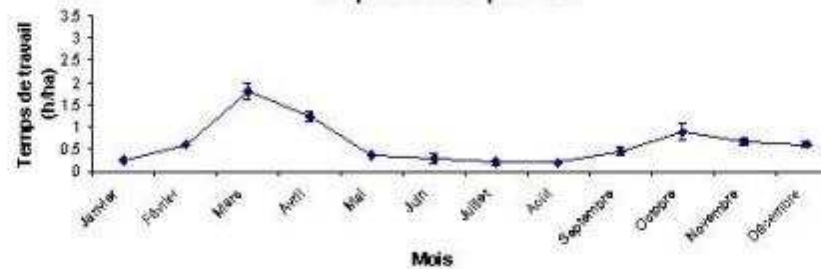
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	154	143	136	154	154	154	154	143	143	136
Coût total carburant (base 0,6 €/L) (€/ha)	93	86	82	93	93	93	93	86	86	82
Coût total des fertilisants (€/ha)	400	400	150	400	400	400	400	150	150	150
Coût total des pesticides (€/ha)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	3,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Sol limono-argileux haut	3,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
Sol argileux bas	3,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5	5,5
Sol salé et hydromorphe	2,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	500										
Marge Brute Sol sableux	164	1168	1440	1166	1163	1163	1163	1401	1382	1428	
Marge Brute Sol limono-argileux haut	414	1418	1690	1416	1413	1413	1413	1651	1632	1678	
Marge Brute Sol argileux bas	414	1418	1690	1416	1413	1413	1413	1651	1632	1678	
Marge Brute Sol salé et hydromorphe	-96	918	1190	916	913	913	913	1151	1132	1178	

Blé Conventionnel Piloté

Résumé de la culture

Culture	Blé									
Mode de conduite	Conventionnel									
Pilotage	Piloté									
Précédent	Riz	Blé	Luzeerne	Colza	Toumesol	Sorgho	Mais	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	5,2	5,5	4,3	4,4	5,0	5,0	5,0	4,1	4,1	4,3
Coût total main d'oeuvre (base 12€/h) (€/ha)	62,4	66	51	52,5	60	60	60	49,5	49,5	51
Coût intrants (€/ha)	346	442	306	442	442	442	442	402	402	306
Coûts mécanisation (€/ha)	326	338	338	279	337	337	341	338	338	338
Coûts de l'eau (€/ha)	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Total coûts de production	752	863	712	791	856	856	860	806	806	712
IFT	1	2	1	2	2	2	2	2	2	1

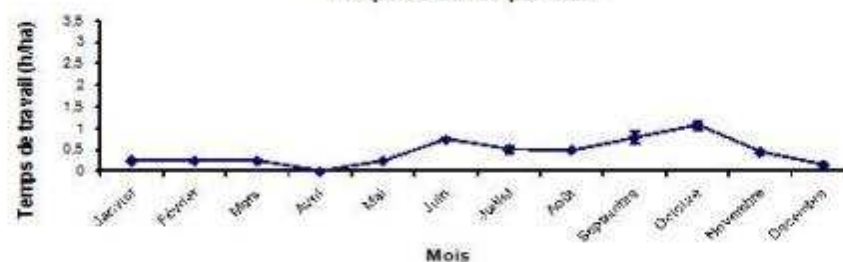
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	106	108	93	86	97	97	97	84	84	93
Coût total carburant (base 0,6 €/L) (€/ha)	64	65	56	52	58	58	58	50	50	56
Coût total des fertilisants (€/ha)	149	149	108	149	149	149	149	108	108	108
Coût total des pesticides (€/ha)	56	152	56	152	152	152	152	152	152	56

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	4,5	4,0	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5	4,5
Sol limono-argileux haut	5,0	4,5	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Sol argileux bas	4,0	4,0	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8	4,8
Sol salé et hydromorphe	4,0	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5	3,5

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	180									
Marge Brute Sol sableux	59	-137	98	19	-48	-48	-50	4	4	98
Marge Brute Sol limono-argileux haut	148	-60	188	109	44	44	40	94	94	188
Marge Brute Sol argileux bas	-32	-143	152	73	8	8	4	58	58	152
Marge Brute Sol salé et hydromorphe	-32	-233	-82	-161	-226	-226	-230	-178	-178	-82

Blé Conventionnel Simplifié

Résumé de la culture

Culture	Blé									
	Conventionnel									
	Simplifié									
Précédent	Riz	Blé	Luzerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Mais	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	4,7	5,0	3,8	3,9	4,5	4,5	4,5	3,6	3,6	3,8
Coût total main d'oeuvre (base 12€/h) (€/ha)	56,4	60	46	46,5	54	54	54	43,5	43,5	46
Coût intrants (€/ha)	250	346	209	346	346	346	346	305	305	209
Coûts mécanisation (€/ha)	326	338	338	279	337	337	341	338	338	338
Coûts de l'eau (€/ha)	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Total coûts de production	649	761	609	688	754	754	758	704	704	609
IFF	0	1	0	1	1	1	1	1	1	0

Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	102	104	89	82	93	93	93	79	79	88
Coût total carburant (base 0,6€/L) (€/ha)	61	62	53	49	56	56	56	48	48	53
Coût total des fertilisants (€/ha)	109	108	69	109	109	109	109	69	69	69
Coût total des pesticides (€/ha)	0	96	0	96	96	96	96	96	96	0

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	3,8	2,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
Sol limone-argileux haut	4,0	3,5	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0	4,0
Sol argileux bas	3,8	3,0	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8	3,8
Sol salé et hydromorphe	3,6	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8	2,8

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	180									
Marge Brute Sol sableux	26	-266	66	-13	-79	-79	-83	-29	-29	66
Marge Brute Sol limone-argileux haut	71	-131	111	32	-34	-34	-38	16	16	111
Marge Brute Sol argileux bas	26	-221	66	-13	-79	-79	-83	-29	-29	66
Marge Brute Sol salé et hydromorphe	26	-266	-103	-182	-248	-248	-262	-198	-198	-103

Blé Biologique

Résumé de la culture

Culture	Blé									
Mode de conduite	Biologique									
Pilotage										
Précédent	Riz	Blé	Luzerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Mais	Lentille	Soja	Prarie
Temps travail total (h/ha)	5.0	5.5	4.7	4.9	4.7	4.5	4.4	4.4	4.4	4.7
Coût total main d'œuvre (base 12 €/h) (€/ha)	59.7	66.3	55.8	58.8	55.8	54.3	54.3	52.8	52.8	55.8
Coût intrants (€/ha)	442	442	292	442	442	442	442	442	442	292
Coûts mécanisation (€/ha)	331	361	361	289	320	320	342	361	361	361
Coûts de l'eau (€/ha)	17	17	17	17	17	17	17	17	17	17
Total coûts de production	850	887	726	807	835	834	856	873	873	726
IFT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

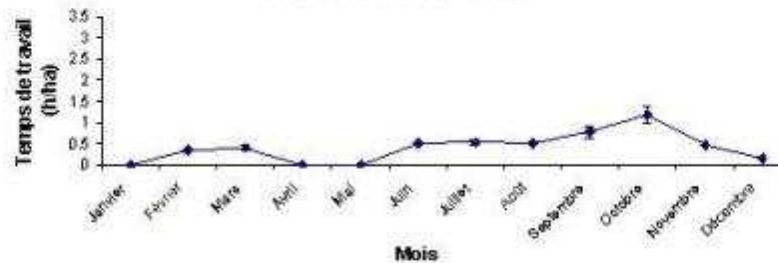
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	103	111	102	100	92	92	92	92	92	102
Coût total carburant (base 0.6 €/L) (€/ha)	62	67	61	60	55	55	55	55	55	61
Coût total des fertilisants (€/ha)	300	300	150	300	300	300	300	300	300	150
Coût total des pesticides (€/ha)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	3.3	2.8	3.3	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	2.8	3.3
Sol limono-argileux haut	3.7	3.1	3.7	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.1	3.7
Sol argileux bas	2.5	3.0	3.5	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.0	3.5
Sol salé et hydromorphe	2.5	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	240									
Marge Brute Sol sableux	-52	-208	72	-129	-157	-155	-177	-195	-195	72
Marge Brute Sol limono-argileux haut	32	-137	156	-58	-86	-84	-106	-124	-124	156
Marge Brute Sol argileux bas	-250	-167	114	-87	-115	-114	-136	-153	-153	114
Marge Brute Sol salé et hydromorphe	-250	-407	-246	-327	-355	-354	-376	-393	-393	-246

Luzerne Conventionnel Piloté

Résumé de la culture

Culture	Luzerne									
Mode de conduite	Conventionnel									
Pilotage	Piloté									
Précédent	Riz	Blé	Luzerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Maïs	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	8,8	8,9	7,7	8,1	8,4	8,9	8,9			
Coût total main d'œuvre (base 12€/h) (€/ha)	105,6	106,2	92,4	97,2	100,2	106,2	106,2			
Coût intrants (€/ha)	438	438	0	438	438	438	438			
Coûts mécanisation (€/ha)	365	365	315	365	365	365	365			
Coûts de l'eau (€/ha)	93	93	93	93	93	93	93			
Total coûts de production	1001	1002	500	993	996	1002	1002			
IFT	0	0	0	0	0	0	0			

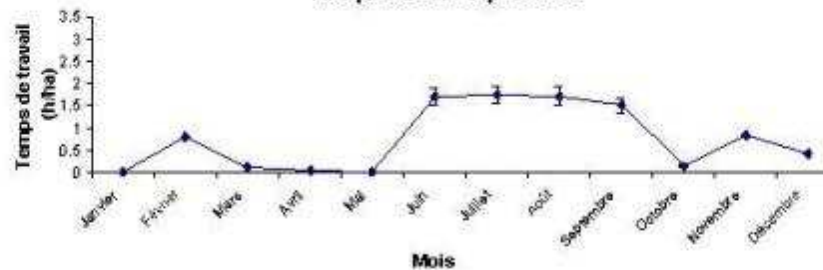
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	139	139	112	128	128	139	139			
Coût total carburant (base 0,6 €/L) (€/ha)	83	83	67	77	77	83	83			
Coût total des fertilisants (€/ha)	320	320	0	320	320	320	320			
Coût total des pesticides (€/ha)	0	0	0	0	0	0	0			

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	6,0	6,0	10,0	6,0	6,0	6,0	6,0			
Sol limono-argileux haut	6,0	6,0	10,0	6,0	6,0	6,0	6,0			
Sol argileux bas	6,0	6,0	10,0	6,0	6,0	6,0	6,0			
Sol salé et hydromorphe	6,0	0,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0			

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	150									
Marge Brute Sol sableux	-101	-102	1000	-93	-96	-102	-102			
Marge Brute Sol limono-argileux haut	-101	-102	1000	-93	-96	-102	-102			
Marge Brute Sol argileux bas	-101	-102	1000	-93	-96	-102	-102			
Marge Brute Sol salé et hydromorphe	-101	-1002	400	-993	-996	-1002	-1002			

Luzerne Conventiel Simplifié

Résumé de la culture

Culture	Luzerne									
Mode de conduite	Conventionnel									
Pilotage	Simplifié									
Précédent	Riz	Blé	Luzerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Maïs	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	8,6	8,6	7,7	7,9	8,1	8,6	8,6			
Coût total main d'œuvre (base 12€/h) (€/ha)	102,6	103,2	92,4	94,2	97,2	103,2	103,2			
Coût intrants (€/ha)	118	118	0	118	118	118	118			
Coûts mécanisation (€/ha)	365	365	315	365	365	365	365			
Coûts de l'eau (€/ha)	93	93	93	93	93	93	93			
Total coûts de production	678	679	500	670	673	679	679			
IFT	0	0	0	0	0	0	0			

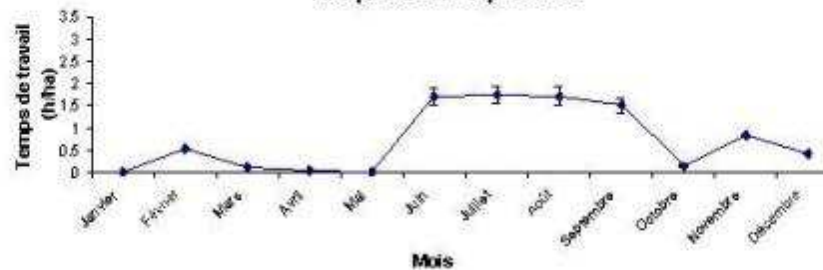
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	137	137	112	126	126	137	137			
Coût total carburant (base 0,6 €/L) (€/ha)	82	82	67	75	75	82	82			
Coût total des fertilisants (€/ha)	0	0	0	0	0	0	0			
Coût total des pesticides (€/ha)	0	0	0	0	0	0	0			

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	4,0	4,0	10,0	4,0	4,0	4,0	4,0			
Sol limono-argileux haut	4,0	4,0	10,0	4,0	4,0	4,0	4,0			
Sol argileux bas	4,0	4,0	10,0	4,0	4,0	4,0	4,0			
Sol salé et hydromorphe	4,0	0,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0			

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	150									
Marge Brute Sol sableux	-78	-79	1000	-70	-73	-79	-79			
Marge Brute Sol limono-argileux haut	-78	-79	1000	-70	-73	-79	-79			
Marge Brute Sol argileux bas	-78	-79	1000	-70	-73	-79	-79			
Marge Brute Sol salé et hydromorphe	-78	-679	400	-670	-673	-679	-679			

Luzerne Biologique

Résumé de la culture

Culture	Luzerne									
Mode de conduite	Biologique									
Pilotage										
Précédent	Riz	Blé	Luzerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Maïs	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	8,6	8,6	7,7	7,9	8,1	8,6	8,6			
Coût total main d'œuvre (base 12€/h) (€/ha)	102,6	103,2	92,4	94,2	97,2	103,2	103,2			
Coût intrants (€/ha)	0	0	0	0	0	0	0			
Coûts mécanisation (€/ha)	391	391	350	391	391	391	391			
Coûts de l'eau (€/ha)	93	93	93	93	93	93	93			
Total coûts de production	587	587	535	578	581	587	587			
IFT	0	0	0	0	0	0	0			

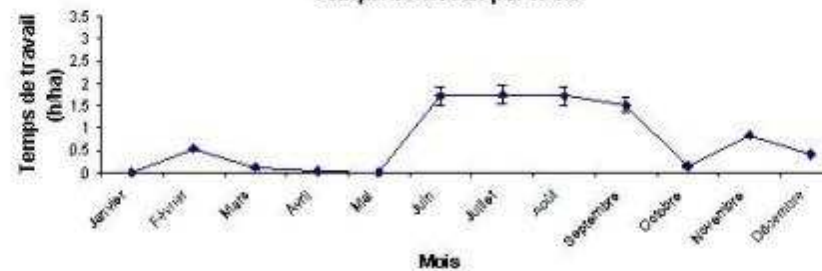
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	137	137	112	126	126	137	137			
Coût total carburant (base 0,6 €/L) (€/ha)	82	82	67	75	75	82	82			
Coût total des fertilisants (€/ha)	0	0	0	0	0	0	0			
Coût total des pesticides (€/ha)	0	0	0	0	0	0	0			

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	4,0	4,0	10,0	4,0	4,0	4,0	4,0			
Sol limono-argileux haut	4,0	4,0	10,0	4,0	4,0	4,0	4,0			
Sol argileux bas	4,0	4,0	10,0	4,0	4,0	4,0	4,0			
Sol salé et hydromorphe	4,0	0,0	6,0	0,0	0,0	0,0	0,0			

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	200									
Marge Brute Sol sableux	213	213	1465	222	219	213	213			
Marge Brute Sol limono-argileux haut	213	213	1465	222	219	213	213			
Marge Brute Sol argileux bas	213	213	1465	222	219	213	213			
Marge Brute Sol salé et hydromorphe	213	-587	665	-578	-581	-587	-587			

Colza Conventionnel Piloté

Résumé de la culture

Culture	Colza									
Mode de conduite	Conventionnel									
Pilotage	Piloté									
Précédent	Riz	Blé	Luzeerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Maïs	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)		5,9	5,3					5,6		
Coût total main d'oeuvre (base 12€/h) (€/ha)		70,5	63					67,5		
Coût intrants (€/ha)		356	286					319		
Coûts mécanisation (€/ha)		352	352					352		
Coûts de feu (€/ha)		17	17					17		
Total coûts de production		796	718					755		
IFT		4	4					4		

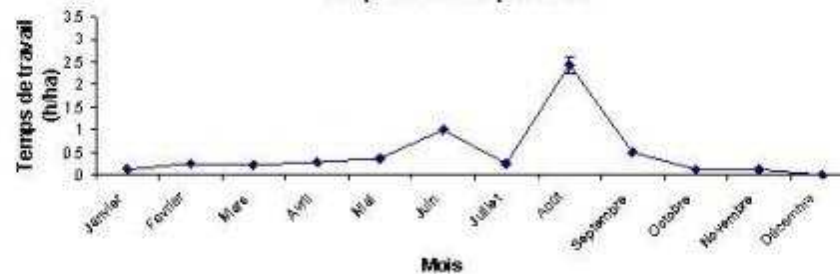
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)		97	95					97		
Coût total carburant (base 0,6 €/L) (€/ha)		58	57					58		
Coût total des fertilisants (€/ha)		171	100					133		
Coût total des pesticides (€/ha)		131	131					131		

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux		2,5	2,5					2,5		
Sol limono-argileux haut		2,5	2,5					2,5		
Sol argileux bas		0,0	0,0					0,0		
Sol salé et hydromorphe		0,0	0,0					0,0		

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	370									
Marge Brute Sol sableux		129	207					170		
Marge Brute Sol limono-argileux haut		129	207					170		
Marge Brute Sol argileux bas										
Marge Brute Sol salé et hydromorphe										

Colza Conventionnel Simplifié

Résumé de la culture

Culture	Colza									
Mode de conduite	Conventionnel									
Pilotage	Simplifié									
Précédent	Riz	Blé	Luzerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Maïs	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)		5,1	4,5					4,9		
Coût total main d'œuvre (base 12€/h) (€/ha)		61,5	54					58,5		
Coût intrants (€/ha)		237	204					237		
Coûts mécanisation (€/ha)		352	352					352		
Coûts de l'eau (€/ha)		17	17					17		
Total coûts de production		668	627					665		
IFT		2	2					2		

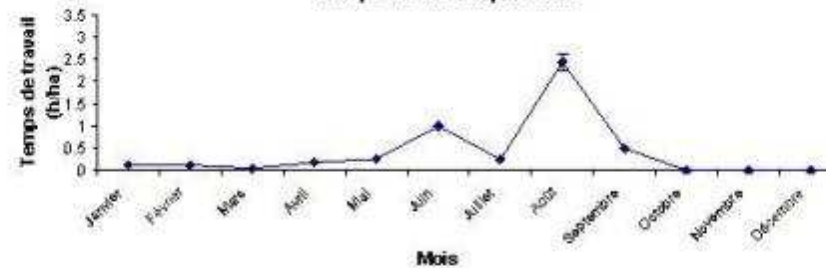
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)		90	88					90		
Coût total carburant (base 0,6 €/L) (€/ha)		54	53					54		
Coût total des fertilisants (€/ha)		96	63					96		
Coût total des pesticides (€/ha)		87	87					87		

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux		2,0	2,0					2,0		
Sol limono-argileux haut		2,0	2,0					2,0		
Sol argileux bas		0,0	0,0					0,0		
Sol salé et hydromorphe		0,0	0,0					0,0		

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	370								
Marge Brute Sol sableux		72	113					75	
Marge Brute Sol limono-argileux haut		72	113					75	
Marge Brute Sol argileux bas									
Marge Brute Sol salé et hydromorphe									

Colza Biologique

Résumé de la culture

Culture	Colza									
Mode de conduite	Biologique									
Pilotage										
Précédent	Riz	Blé	Luzeerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Maïs	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)		4,7	4,1					3,2		
Coût total main d'oeuvre (base 12€/h) (€/ha)		56,7	49,2					38,7		
Coût intrants (€/ha)		361	211					211		
Coûts mécanisation (€/ha)		309	309					309		
Coûts de l'eau (€/ha)		17	17					17		
Total coûts de production		744	596					576		
IFT		0	0					0		

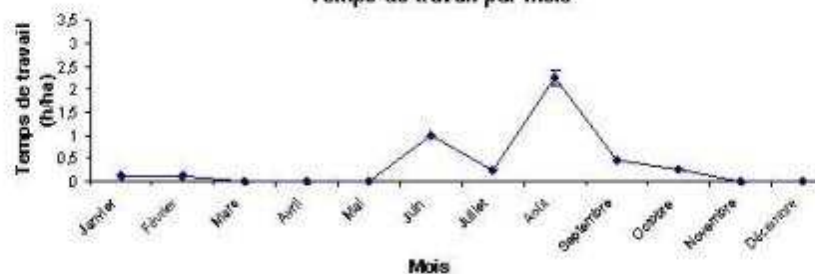
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)		87	85					53		
Coût total carburant (base 0,6 €/L) (€/ha)		52	51					32		
Coût total des fertilisants (€/ha)		295	145					145		
Coût total des pesticides (€/ha)		0	0					0		

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux		1,5	1,5					1,5		
Sol limono-argileux haut		1,5	1,5					1,5		
Sol argileux bas										
Sol salé et hydromorphe										

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	500									
Marge Brute Sol sableux		6	164					174		
Marge Brute Sol limono-argileux haut		6	164					174		
Marge Brute Sol argileux bas										
Marge Brute Sol salé et hydromorphe										

Tournesol Conventionnel

Résumé de la culture

Culture	Tournesol									
Mode de conduite	Conventionnel									
Pilotage										
Précédent	Riz	Blé	Luzerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Mais	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	6,7	6,3	5,3	6,0		6,3	6,3	5,8		
Coût total main d'œuvre (base 12€/h) (€/ha)	80,7	75,3	63,3	72,3		75,3	75,3	69,3		
Coût intrants (€/ha)	219	219	179	219		219	219	179		
Coûts mécanisation (€/ha)	399	399	399	399		399	399	399		
Coûts de feu (€/ha)	17	17	17	17		17	17	17		
Total coûts de production	715	710	657	707		710	710	663		
IFT	1	1	1	1		1	1	1		

Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	126	118	105	118		118	118	110		
Coût total carburant (base 0,6 €/L) (€/ha)	76	71	63	71		71	71	69		
Coût total des fertilisants (€/ha)	74	74	33	74		74	74	33		
Coût total des pesticides (€/ha)	70	70	70	70		70	70	70		

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	2,2	2,2	2,2	2,2		2,2	2,2	2,2		
Sol limono-argileux haut	2,8	2,8	2,8	2,8		2,8	2,8	2,8		
Sol argileux bas	2,8	2,8	2,8	2,8		2,8	2,8	2,8		
Sol salé et hydromorphe	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0		



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	280									
Marge Brute Sol sableux	-99	-94	-41	-91		-94	-94	-47		
Marge Brute Sol limono-argileux haut	69	74	127	77		74	74	121		
Marge Brute Sol argileux bas	69	74	127	77		74	74	121		
Marge Brute Sol salé et hydromorphe										

Tournesol Biologique

Résumé de la culture

Culture	Tournesol									
Mode de conduite	Biologique									
Pilotage										
Précédent	Riz	Blé	Luzeerne	Cotza	Tournesol	Sorgho	Maïs	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	6,2	5,6	5,3	5,3		5,6	5,6	5,3	0,0	
Coût total main d'oeuvre (base 12€/h) (€/ha)	74,1	66,6	63,6	63,6		66,6	66,6	63,6	0	
Coût intrants (€/ha)	133	133	133	133		133	133	133	0	
Coûts mécanisation (€/ha)	398	398	398	398		398	398	398	398	
Coûts de l'eau (€/ha)	17	17	17	17		17	17	17	17	
Total coûts de production	622	614	611	611		614	614	611	415	
IFT	0	0	0	0		0	0	0	0	

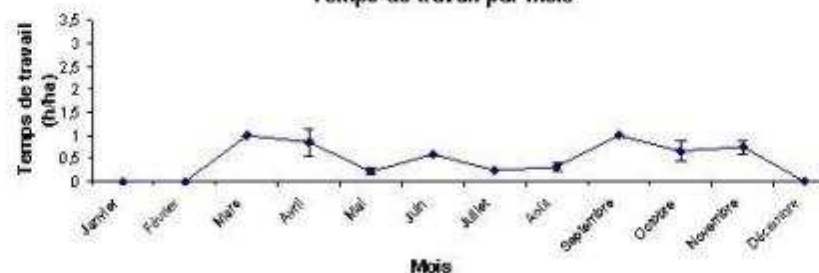
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	118	111	111	111		111	111	111	0	
Coût total carburant (base 0,6 €/L) (€/ha)	71	66	66	66		66	66	66	0	
Coût total des fertilisants (€/ha)	0	0	0	0		0	0	0	0	
Coût total des pesticides (€/ha)	0	0	0	0		0	0	0	0	

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	1,9	1,9	1,9	1,9		1,9	1,9	1,9	1,9	
Sol limono-argileux haut	2,2	2,2	2,2	2,2		2,2	2,2	2,2	2,2	
Sol argileux bas	2,2	2,2	2,2	2,2		2,2	2,2	2,2	2,2	
Sol salé et hydromorphe	0,0	0,0	0,0	0,0		0,0	0,0	0,0	0,0	

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	500									
Marge Brute Sol sableux	313	321	324	324		321	321	324	520	
Marge Brute Sol limono-argileux haut	478	486	489	489		486	486	489	685	
Marge Brute Sol argileux bas	478	486	489	489		486	486	489	685	
Marge Brute Sol salé et hydromorphe										

Maïs Conventionnel

Résumé de la culture

Culture	Maïs									
Mode de conduite	Conventionnel									
Pilotage										
Précédent	Riz	Blé	Luzerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Maïs	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	5,9	8,4	4,7	5,7	5,9	5,9	5,9	5,4	5,4	4,7
Coût total main d'oeuvre (base 12€/h) (€/ha)	70,2	78,8	55,8	67,8	70,8	70,8	70,8	64,8	64,8	55,8
Coût intrants (€/ha)	641	641	425	641	641	641	641	641	641	425
Coûts mécanisation (€/ha)	362	362	362	362	362	362	362	362	362	362
Coûts de feau (€/ha)	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68
Total coûts de production	1141	1147	910	1138	1141	1141	1141	1135	1135	910
IFT	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2

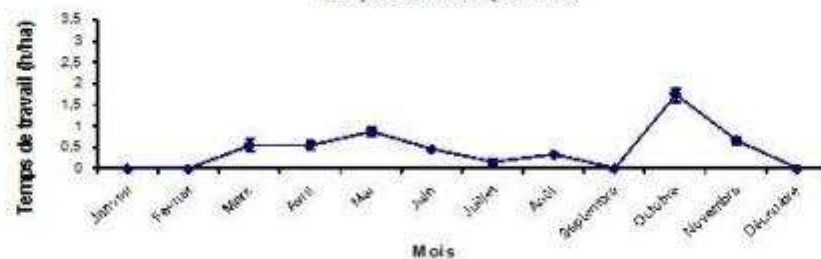
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	108	116	92	108	108	108	108	105	105	92
Coût total carburant (base 0,6 €/L) (€/ha)	65	70	55	65	65	65	65	63	63	55
Coût total des fertilisants (€/ha)	306	306	90	306	306	306	306	306	306	90
Coût total des pesticides (€/ha)	95	95	95	95	95	95	95	95	95	95

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Sol limono-argileux haut	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0	10,0
Sol argileux bas	10,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0
Sol salé et hydromorphe										

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	160									
Marge Brute Sol sableux	459	453	690	462	459	459	459	465	465	690
Marge Brute Sol limono-argileux haut	459	453	690	462	459	459	459	465	465	690
Marge Brute Sol argileux bas	459	133	370	142	139	139	139	145	145	370
Marge Brute Sol salé et hydromorphe										

Maïs Biologique

Résumé de la culture

Culture	Maïs									
Mode de conduite	Biologique									
Pilotage										
Précédent	Riz	Blé	Luzerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Maïs	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	5,8	5,8	4,4	5,6	6,3			6,1	6,1	4,4
Coût total main d'œuvre (base 12€/h) (€/ha)	69	69,6	53,1	66,6	75,6			72,6	72,6	53,1
Coût intrants (€/ha)	290	290	145	290	290			290	290	145
Coûts mécanisation (€/ha)	490	490	490	490	490			490	490	490
Coûts de l'eau (€/ha)	68	68	68	68	68			68	68	68
Total coûts de production	917	918	756	915	924			921	921	756
IFT	0	0	0	0	0			0	0	0

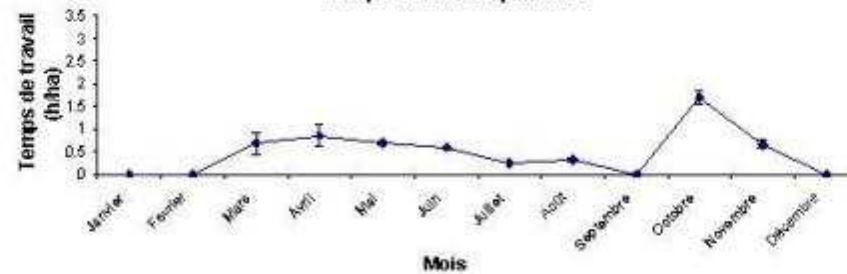
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	112	112	92	112	121			121	121	92
Coût total carburant (base 0,6 €/L) (€/ha)	67	67	55	67	72			72	72	55
Coût total des fertilisants (€/ha)	290	290	145	290	290			290	290	145
Coût total des pesticides (€/ha)	0	0	0	0	0			0	0	0

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	9,0	8,0	9,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	9,0
Sol limono-argileux haut	9,0	8,0	9,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	8,0	9,0
Sol argileux bas	9,0	7,0	8,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	7,0	8,0
Sol salé et hydromorphe										

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	270									
Marge Brute Sol sableux	1513	1242	1674	1245	1236			1239	1239	1674
Marge Brute Sol limono-argileux haut	1513	1242	1674	1245	1236			1239	1239	1674
Marge Brute Sol argileux bas	1513	972	1404	975	966			969	969	1404
Marge Brute Sol salé et hydromorphe										

Sorgho Conventionnel

Résumé de la culture

Culture	Sorgho									
	Conventionnel									
Mode de conduite										
Pilotage										
Précédent	Riz	Blé	Luzerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Mais	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	5,7	6,0	4,8	5,5	5,8	5,8	5,8	5,5	5,5	4,8
Coût total main d'oeuvre (base 12€/h) (€/ha)	68,7	72,3	57,3	66,3	69,3	69,3	69,3	66,3	66,3	57,3
Coût intrants (€/ha)	64	64	0	64	64	64	64	64	64	0
Coûts mécanisation (€/ha)	394	394	394	394	394	394	394	394	394	394
Coûts de l'eau (€/ha)	68	68	68	68	68	68	68	68	68	68
Total coûts de production	595	598	519	592	595	595	595	592	592	519
IFT	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

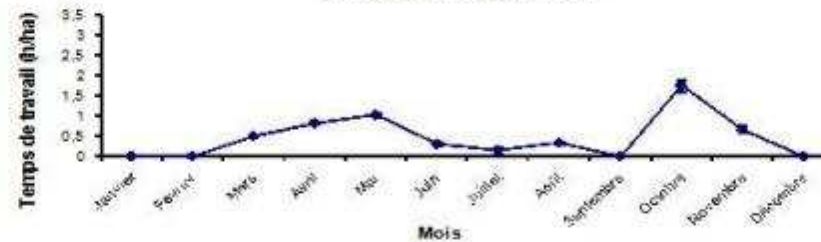
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	113	118	100	113	113	113	113	113	113	100
Coût total carburant (base 0,6 €/L) (€/ha)	68	69	60	68	68	68	68	68	68	60
Coût total des fertilisants (€/ha)	64	64	0	64	64	64	64	64	64	0
Coût total des pesticides (€/ha)	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Sol limono-argileux haut	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0
Sol argileux bas	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0	5,0
Sol salé et hydromorphe	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	150									
Marge Brute Sol sableux	305	302	381	308	305	305	305	308	308	381
Marge Brute Sol limono-argileux haut	305	302	381	308	305	305	305	308	308	381
Marge Brute Sol argileux bas	155	152	231	158	155	155	155	158	158	231
Marge Brute Sol salé et hydromorphe	-595	-598	-519	-592	-595	-595	-595	-592	-592	-519

Sorgho Biologique

Résumé de la culture

Culture	Sorgho									
Mode de conduite	Biologique									
Pilotage										
Précédent	Riz	Blé	Luzerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Maïs	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	6.3	6.4	5.4	6.1	7.4			6.9	6.9	5.4
Coût total main d'oeuvre (base 12€/h) (€/ha)	75.6	76.2	64.2	73.2	88.2			82.2	82.2	64.2
Coût intrants (€/ha)	145	145	0	145	145			0	0	0
Coûts mécanisation (€/ha)	420	420	420	420	420			420	420	420
Coûts de l'eau (€/ha)	68	68	68	68	68			68	68	68
Total coûts de production	709	709	552	706	721			570	570	552
IFT	0	0	0	0	0			0	0	0

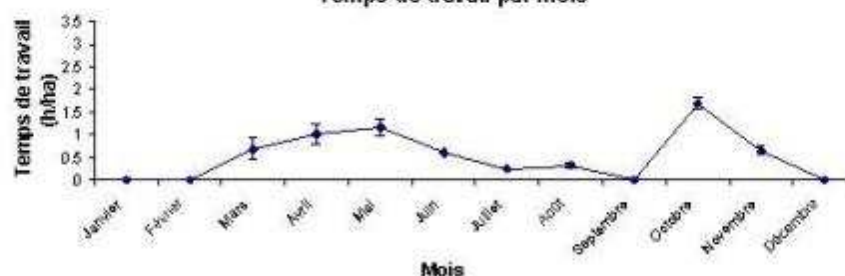
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	123	123	110	123	139			137	137	110
Coût total carburant (base 0.6 €/L) (€/ha)	74	74	66	74	83			82	82	66
Coût total des fertilisants (€/ha)	145	145	0	145	145			0	0	0
Coût total des pesticides (€/ha)	0	0	0	0	0			0	0	0

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8			4.8	4.8	4.8
Sol limono-argileux haut	4.8	4.8	4.8	4.8	4.8			4.8	4.8	4.8
Sol argileux bas	4.0	4.0	4.0	4.0	4.0			4.0	4.0	4.0
Sol salé et hydromorphe										

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	255									
Marge Brute Sol sableux	515	515	672	518	503			654	654	672
Marge Brute Sol limono-argileux haut	515	515	672	518	503			654	654	672
Marge Brute Sol argileux bas	311	311	468	314	299			450	450	468
Marge Brute Sol salé et hydromorphe										

Soja Conventiennel

Résumé de la culture

Culture	Soja									
Mode de conduite	Conventionnel									
Pilotage										
Précédent	Riz	Blé	Luzerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Maïs	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	5,8	5,5			4,1	5,9	5,9			
Coût total main d'oeuvre (base 12€/h)(€/ha)	69,9	66			49,5	70,5	70,5			
Coût intrants (€/ha)	285	285			285	285	285			
Coûts mécanisation (€/ha)	334	334			334	334	334			
Coûts de l'eau (€/ha)	68	68			68	68	68			
Total coûts de production	757	753			737	758	758			
IFT	2	2			2	2	2			

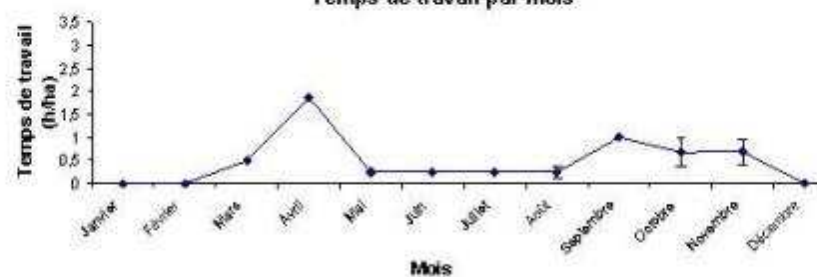
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	112	101			72	112	112			
Coût total carburant (base 0,6 €/L)(€/ha)	67	60			43	67	67			
Coût total des fertilisants (€/ha)	33	33			33	33	33			
Coût total des pesticides (€/ha)	90	90			90	90	90			

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	4,0	4,0			4,0	4,0	4,0			
Sol limono-argileux haut	4,0	4,0			4,0	4,0	4,0			
Sol argileux bas	2,5	2,5			2,5	2,5	2,5			
Sol salé et hydromorphe	0,0	0,0			0,0	0,0	0,0			

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	300									
Marge Brute Sol sableux	443	447			464	443	443			
Marge Brute Sol limono-argileux haut	443	447			464	443	443			
Marge Brute Sol argileux bas	-7	-3			14	-8	-8			
Marge Brute Sol salé et hydromorphe										

Soja Biologique

Résumé de la culture

Culture	Soja									
Mode de conduite	Biologique									
Pilotage										
Précédent	Riz	Blé	Luzerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Maïs	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	6,8	6,9			6,0	6,9	6,9			
Coût total main d'œuvre (base 12€/h) (€/ha)	81,6	82,2			71,7	82,2	82,2			
Coût intrants (€/ha)	25	25			25	25	25			
Coûts mécanisation (€/ha)	397	397			397	397	397			
Coûts de l'eau (€/ha)	68	68			68	68	68			
Total coûts de production	572	572			562	572	572			
IFT	0	0			0	0	0			

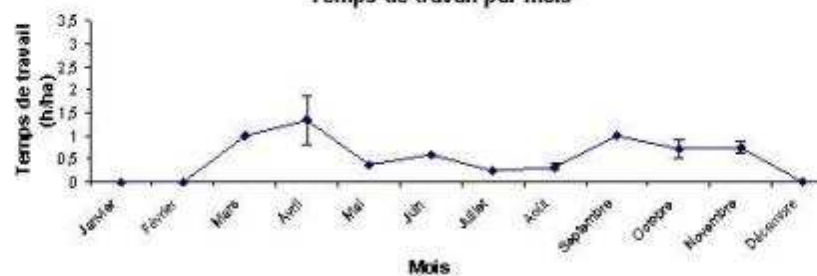
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	130	130			117	130	130			
Coût total carburant (base 0,6 €/L) (€/ha)	78	78			70	78	78			
Coût total des fertilisants (€/ha)	0	0			0	0	0			
Coût total des pesticides (€/ha)	0	0			0	0	0			

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	3,2	3,2			3,2	3,2	3,2			
Sol limono-argileux haut	3,2	3,2			3,2	3,2	3,2			
Sol argileux bas	2,1	2,1			2,1	2,1	2,1			
Sol salé et hydromorphe										

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	450									
Marge Brute Sol sableux	868	868			878	868	868			
Marge Brute Sol limono-argileux haut	868	868			878	868	868			
Marge Brute Sol argileux bas	373	373			383	373	373			
Marge Brute Sol salé et hydromorphe										

Lentille Conventionnel

Résumé de la culture

Culture	Lentille									
Mode de conduite	Conventionnel									
Pilotage										
Précédent	Riz	Blé	Luzerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Maïs	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	4,8	4,9		0,0	4,9	4,9	4,9		4,6	0,0
Coût total main d'oeuvre (base 12€/h)(€/ha)	57,9	58,5		0	58,5	58,5	58,5		55,5	0
Coût intrants (€/ha)	125	125		0	125	125	125		125	0
Coûts mécanisation (€/ha)	301	301		301	301	301	301		301	301
Coûts de l'eau (€/ha)	17	17		17	17	17	17		17	17
Total coûts de production	501	502		318	502	502	502		499	318
IFT	0	0		0	0	0	0		0	0

Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	103	103		0	103	103	103		103	0
Coût total carburant (base 0,6 €/L)(€/ha)	62	62		0	62	62	62		62	0
Coût total des fertilisants (€/ha)	0	0		0	0	0	0		0	0
Coût total des pesticides (€/ha)	0	0		0	0	0	0		0	0

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Sol limono-argileux haut	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Sol argileux bas	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5
Sol salé et hydromorphe										

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	300									
Marge Brute Sol sableux	-51	-52		132	-52	-52	-52		-49	132
Marge Brute Sol limono-argileux haut	-51	-52		132	-52	-52	-52		-49	132
Marge Brute Sol argileux bas	-51	-52		132	-52	-52	-52		-49	132
Marge Brute Sol salé et hydromorphe										

Lentille Biologique

Résumé de la culture

Culture	Lentille									
Mode de conduite	Biologique									
Pilotage										
Précédent	Riz	Blé	Luzerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Maïs	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	4,8	4,4			4,9	4,9	4,9		4,6	
Coût total main d'oeuvre (base 12€/h) (€/ha)	57,9	52,5			58,5	58,5	58,5		55,5	
Coût intrants (€/ha)	200	200			200	200	200		200	
Coûts mécanisation (€/ha)	304	304			304	304	304		304	
Coûts de l'eau (€/ha)	17	17			17	17	17		17	
Total coûts de production	579	574			580	580	580		577	
IFT	0	0			0	0	0		0	

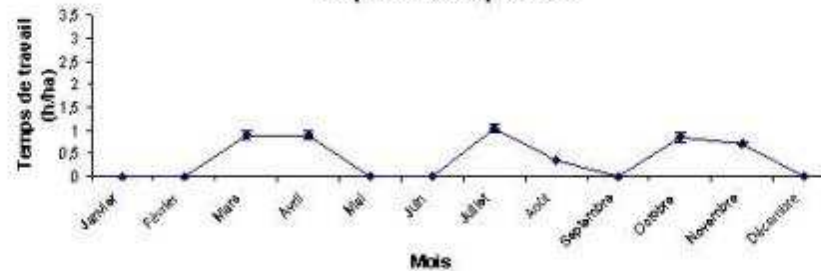
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	103	94			103	103	103		103	
Coût total carburant (base 0,6 €/L) (€/ha)	62	56			62	62	62		62	
Coût total des fertilisants (€/ha)	0	0			0	0	0		0	
Coût total des pesticides (€/ha)	0	0			0	0	0		0	

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	1,0	1,0			1,0	1,0	1,0		1,0	
Sol limono-argileux haut	1,0	1,0			1,0	1,0	1,0		1,0	
Sol argileux bas	1,0	1,0			1,0	1,0	1,0		1,0	
Sol salé et hydromorphe										

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	500									
Marge Brute Sol sableux	-79	-74			-80	-80	-80		-77	
Marge Brute Sol limono-argileux haut	-79	-74			-80	-80	-80		-77	
Marge Brute Sol argileux bas	-79	-74			-80	-80	-80		-77	
Marge Brute Sol salé et hydromorphe										

Prairie Conventiel

Résumé de la culture

Culture	Prairie									
Mode de conduite	Conventionnel									
Pilotage										
Précédent	Riz	Blé	Luzerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Maïs	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	5,2	5,2		5,2	5,2	5,2	5,2		5,2	1,7
Coût total main d'oeuvre (base 12€/h) (€/ha)	61,8	61,8		61,8	61,8	61,8	61,8		61,8	20
Coût intrants (€/ha)	118	118		118	118	118	118		118	0
Coûts mécanisation (€/ha)	230	230		230	230	230	230		230	79
Coûts de l'eau (€/ha)	93	93		93	93	93	93		93	93
Total coûts de production	503	503		503	503	503	503		503	192
IFT	0	0		0	0	0	0		0	0

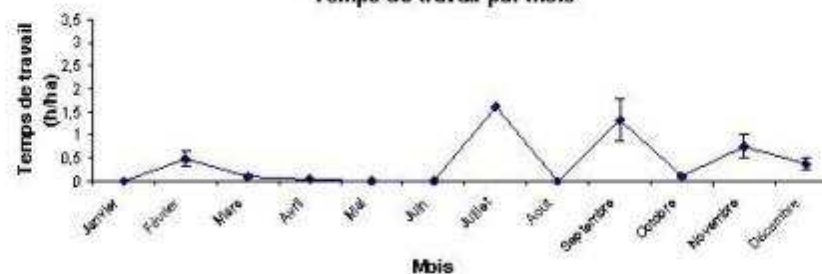
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	81	81		81	81	81	81		81	28
Coût total carburant (base 0,6 €/L) (€/ha)	48	48		48	48	48	48		48	17
Coût total des fertilisants (€/ha)	0	0		0	0	0	0		0	0
Coût total des pesticides (€/ha)	0	0		0	0	0	0		0	0

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Sol limono-argileux haut	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Sol argileux bas	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Sol salé et hydromorphe	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	100									
Marge Brute Sol sableux	-203	-203		-203	-203	-203	-203		-203	108
Marge Brute Sol limono-argileux haut	-203	-203		-203	-203	-203	-203		-203	108
Marge Brute Sol argileux bas	-203	-203		-203	-203	-203	-203		-203	108
Marge Brute Sol salé et hydromorphe	-203	-403		-403	-403	-403	-403		-403	-92

Prairie Biologique

Résumé de la culture

Culture	Prairie									
Mode de conduite	Biologique									
Pilotage										
Précédent	Riz	Blé	Luzeerne	Colza	Tournesol	Sorgho	Mais	Lentille	Soja	Prairie
Temps travail total (h/ha)	5,2	5,2		5,2	5,2	5,2	5,2		5,2	1,7
Coût total main d'oeuvre (base 1,2€/h) (€/ha)	62	62		62	62	62	62		62	20
Coût intrants (€/ha)	118	118		118	118	118	118		118	0
Coûts mécanisation (€/ha)	249	249		249	249	249	249		249	78
Coûts de l'eau (€/ha)	93	93		93	93	93	93		93	93
Total coûts de production	522	522		522	522	522	522		522	191
IFT	0	0		0	0	0	0		0	0

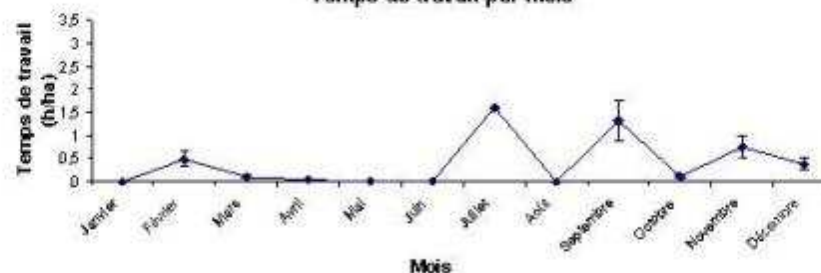
Détails des coûts d'intrants

Consommation totale carburant (L/ha)	81	81		81	81	81	81		81	28
Coût total carburant (base 0,6 €/L) (€/ha)	48	48		48	48	48	48		48	17
Coût total des fertilisants (€/ha)	0	0		0	0	0	0		0	0
Coût total des pesticides (€/ha)	0	0		0	0	0	0		0	0

Rendement moyen soumis à une variabilité climatique (t/ha)

Sol sableux	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Sol limono-argileux haut	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Sol argileux bas	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0	3,0
Sol salé et hydromorphe	3,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0

Temps de travail par mois



Résultat brut hors prime (€/ha)

Prix de vente indicatif (€/t)	100									
Marge Brute Sol sableux	-222	-222		-222	-222	-222	-222		-222	109
Marge Brute Sol limono-argileux haut	-222	-222		-222	-222	-222	-222		-222	109
Marge Brute Sol argileux bas	-222	-222		-222	-222	-222	-222		-222	109
Marge Brute Sol salé et hydromorphe	-222	-422		-422	-422	-422	-422		-422	-91

Annexe F : Multi-scale integrated assessment of regional conversion to Organic Farming.

Multi-scale integrated assessment of regional conversion to Organic Farming³⁴.

Lopez-Ridaura S.¹, Delmotte S.¹, Le Page C.², Le Quéré L.¹, Goulevant G.¹, Chauvelon, P.³, Sandoz A.³, Mouret J.C.¹

¹ INRA UMR 0951 Innovation F-34000 Montpellier, France

² CIRAD UPR Green, F-34000 Montpellier, France

³ Tour du Valat, Research centre for the conservation of Mediterranean wetlands F-13200 Arles, France

Abstract

The rapid growth of organic agriculture in the last decade suggests that this form of farming could become a prototype for agricultural development. The regional conversion to Organic Farming (OF) might represent great advantages in terms of ecosystems integrity and local natural resource conservation.

However, is this regional conversion possible? What could be the consequences at regional scale in terms of social and economic development as well as nature conservation? Taking into account the heterogeneity of farms and farming systems in the region, are there farmers more prone to conversion and others facing great obstacles?

The objective of this paper is to show the results of different scenario analyses about the extension of OF in Camargue, South of France. The application of different modeling approaches with great potential for the multi-scale and multi-criteria evaluation of the extension of OF is presented: Bio-economic models, Agent-based models and Land use/cover change models. According to our results, in the Camargue, the most probable conversion in the near future would take place in fields with low salt pressure belonging to livestock breeders and diversified cereal producers. However, the regional conversion to OF is plausible as the region could maintain its economic productivity while decreasing the potential harmful effect to the environment. Finally, the possible trajectories of conversion suggest that certain farmers (specialised in rice production) might need greater help to assure such conversion to OF as their economic performance is hampered during that period.

The application of these three approaches to explore the same scenario in one region revealed their complementarity for tackling the complex issue of regional conversion to OF from different angles.

Keywords: Bio-economic models, Agent-based models, Land use change analysis, Camargue

³⁴ Lopez Ridaura, S., Delmotte, S., Le Page, C., Le Quéré, L., Goulevant, G., Chauvelon, P., Sandoz, A., Mouret, J.-C., Submitted. Multi-criteria and multi-scales evaluation of different organic farming extension scenario. In: Penvern, S., Savini, I., Bellon, S. (Eds.), *Organic Farming prototype for sustainable agricultures?* Springer-Verlag

1. INTRODUCTION

Organic Farming (OF) has reached the status of a viable option for more sustainable agriculture among farmers, policy maker and consumers. In 2009, it was practiced in over 3.5 million hectares in the EU25 representing 5.1% of the agricultural area. In some countries like Austria, Switzerland, Sweden, Estonia and the Check Republic, organic farming occupied more than 10 % of the agricultural area and in other countries like Spain, Greece and Portugal the surface on organic agriculture has tripled in the last ten years (EUROSTAT 2009).

This rapid growth of OF poses new questions and challenges concerning the future evolution of agriculture in general and of organic agriculture in particular. At the farm scale, the conventionalisation of OF has been widely discussed by Darnhofer et al (2009) witnessing, on the one hand, an increase on the size of organic farms and their specialization and, on the other, higher intensification of the agricultural techniques (e.g. more concentrate use and disease treatments for animals and an intensive use of organic fertilizers in arable land).

The effects of this extension of OF set new challenges for agricultural research where new questions are rising related to the effect of total or partial conversion to OF of a given region (Acs *et al.*, 2007). Beyond a sectorial perspective, a territorial approach is needed to understand the economic; environmental and social consequences of such extension of OF. This requires a multiscale and integrated assessment to inform policy development.

In Camargue, a deltaic region in the south of France, OF has been presented as a potential way for reducing the externalities of current agricultural practices. There, agriculture plays a crucial role in the economic, ecological and social equilibrium of the region. The region has been labeled as a Biosphere Reserve (Man and Biosphere Program of UNESCO) since 1977, and hosts a Natural Regional Park, a National Reserve and many other associative or private protected areas.

About 50 000 ha are cultivated in Camargue. Farming systems are based on the production of cereals and livestock breeding. Irrigated rice is the main important crop production with about 20 000 ha devoted to it each year. Cropping systems play a crucial role in the water dynamics of this humid region. Most land is at sea level and salinization is a natural process due to the negative water balance between rain and evapo-transpiration. Irrigation of rice then plays the role in desalinating the soils. Irrigation water that enters through pumping from the Rhone-River plays a key function to maintain the level of water and salt concentration of the central lagoon of the Camargue, the Vaccarès (Figure 1) that is the temporary habitat of several migrating bird species.

However, continuous rice production uses large quantities of pesticides, mainly herbicides. These herbicides disperse throughout the environment and, given the high diversity and interest of the local fauna and flora, ecologists have long called for a reduction in the use of pesticides. The extension of OF in the Camargue would certainly imply a decrease in the area of irrigated rice due to the difficulty of managing weeds in these systems. In fact, one crop of organic rice on a single field has to be separated by at least five other crops (i.e. by five years), whereas in conventional cropping systems, it is possible to grow continuous rice by using herbicides.

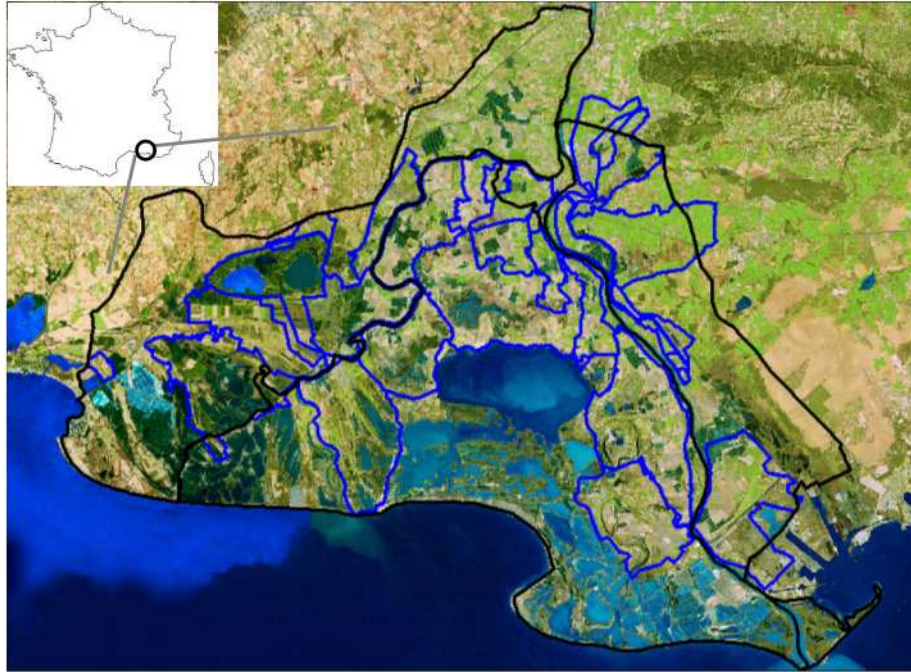


Figure 1. The Camargue Region, in black the limits of Biosphere Reserve and in blue the drainage perimeters (Data from the Parc Naturel Regional de Camargue, the Syndicat Mixte de la Camargue Gardoise and the Syndicat Mixte de Gestion des Associations Syndicales Autoris ees)

Many actors are concerned with the extension of OF in Camargue. Farmers, ecologists, agricultural and environmental policy makers, cooperative directors, as well as technical advice and inputs suppliers, have something to say about the, either negative or positive expectations, of such a switch in the prevailing agricultural systems. The analysis on the extension of OF must then be able to incorporate their views on the different plausible pathways for regional conversion to OF. It must allow the evaluation of different scenarios regarding several indicators relevant to them and at different levels such as the farm and region. For such multi-scale and multi-criteria evaluation of scenarios on the extension of OF, methods and approaches developed within the field of land use analysis (land use planning, land use policy, land use change) might importantly contribute.

The objectives of this paper are (i) to present the results of different scenario analyses about the extension of OF in the Camargue and (ii) to highlight the potential of different modeling approaches for the multi-scale and multi-criteria evaluation of the extension of OF.

For this, we briefly describe, in the section 2, three modeling approaches used in the prospective analysis of agricultural change at the supra-farm scale (Bio-economic models, Agent based models and Land use/cover change models) as well as the main information used for their application in the case of the extension of OF in the Camargue.

Section 3 shows the results of the application of these approaches to assess the extension of OF in Camargue and section 4 discusses some of the main findings of the scenario analysis and the complementarities of the three methods to make prospective multi-criteria and multi-scale analysis of agricultural change.

2. Materials and methods

2.1 APPROACHES FOR PROSPECTIVE, MULTISCALE AND INTEGRATED ASSESSMENT OF THE EVOLUTION OF THE FARMING ACTIVITIES IN A REGION

In relation to agricultural systems and land use we identified three approaches commonly used for scenario analysis (Delmotte *et al.*, Submitted-c): (i) Bio-economic modeling (BEM), (ii) Agent based modeling (ABM) and (iii) Land use change modeling (LUC). These three approaches are briefly described in the next paragraphs.

The objective of LUC models is to describe the actual land use and to give insights on the possible changes of land use pattern that would occur in the near future following either some biophysical or demographic changes (Veldkamp *et al.*, 1996a) or economic and structural changes (Verburg *et al.*, 2004). LUC approaches cover a wide range of methods but most of them are “descriptive models that aim at simulating the functioning of the land use system and the spatially explicit simulation of near future land use patterns” (Verburg *et al.*, 2004).

It is based on the identification of drivers that are correlated with the observed past or current land use. These driving factors can be socio-economic aspects, such as demography and commodity demand; infrastructure development (e.g. a new road or the presence of a market), or biophysical aspects such as type of soil and climate. This allows to identify the probable spots of changes, i.e. locations where changes are more likely to happen. LUC has been largely applied in different case studies and different models exist in the literature for deforestation (GEOMOD 2, (Pontius *et al.*, 2001)), urban extension (White *et al.*, 2000) and agriculture (CLUE-S (Verburg *et al.*, 2002)). In CLUE (Conversion of Land Use and its Effect), correlations are used to evaluate what would be the probable change in land use following for example a change in commodity demand, policy instruments and, infrastructure development (de Koning *et al.*, 1999).

Bio-Economic Models (BEM) are economic models that include a biological component to take into account the variations of agricultural activities performance and impacts due to climate and soil factors variability. BEM aim at identifying optimum combinations of agricultural activities that maximize or minimize an objective. Optimum systems are often obtained using a Multiple Goal Linear Programming (MGLP) model where one goal is defined by an objective function, the others being described in constraint functions (Janssen *et al.*, 2007). This optimization has been done for objectives defined at different scales, most commonly at the farm (Janssen *et al.*, 2007) and regional scale (Laborte *et al.*, 2007).

Agricultural activities need to be quantitatively described at the scale of the field or livestock unit, these data being used as a basis for optimization. Farms are described by their resources, i.e. area of lands and their soil types. The definition of the objectives and constraints that will represent the land use decision is the key step in the model building. Mathematical programming, at the basis of BEM, has become a common tool in agricultural sciences in the last decades in support for decision-making and assessment of agricultural systems. Different kinds of scenarios can be evaluated such as the impacts of a change of context (change of prices or subsidies levels) and change the impacts of the introduction of an alternative system (e.g. organic farming).

Agent Based Models (ABM) represents systems as agents in interaction, with a social structure, and using resources in an environment. Agents perceive, self-represent and act in their environment by making decision and interacting with other agents. Each agent has its own tendencies and objectives (Ferber, 2006). ABM is an approach originally developed from computer sciences to study the dynamics of complex systems and reproduce phenomenon that emerge from the addition and interactions of individual behaviors. ABM can be based on multiple formalisms for representing the decision-making by the agents. In case of human agents, decision-rules are often defined with thresholds and if-then rules (conditional).

This individual centered approaches are increasingly used to represent nature-society interactions (Ligtenberg *et al.*, 2004; Monticino *et al.*, 2007), in particular in the domain of natural resources management (NRM) (Mathevet *et al.*, 2003; Bousquet *et al.*, 2004). Specific platforms such as CORMAS (Bousquet *et al.*, 1998) or NetLogo (Wilensky, 1999) allow to create simulations where agents are interacting with one or more resources. In the context of NRM systems, ABM often integrate a spatial representation of the land with an agent based model to represent the decision-making process of individuals deciding on the use of these spatial units (Bousquet *et al.*, 2004). This allows studying the interaction between the resources and the agents' decisions in a dynamic manner and to calculate the impact of these decisions at different (and aggregated) scales.

In methodological terms, our objective is to test the application of these three modeling approaches to evaluate scenarios of extension of OF in the Camargue. Our hypothesis is that these different approaches respond to different queries within scenario analysis and they are potentially complementary. Common to the application of these approaches is the quantitative descriptions of current farming systems and cropping activities, as well as the identification of indicators for scenario evaluation.

2.2 Systems characterization at different scales

In the Camargue, about 180 farmers depend on crop production for their economic viability. Their main activities are crop production and for some of them, livestock breeding. The main crop of the region are rice, durum-wheat and in lower quantity sunflower, maize, oil seed rape and sorghum. Based on several data-bases, we developed a farm typology that resulted in 9 farm-types (Goulevant *et al.*, 2011). These farm-types depend on the size of farms, the proportion of rice in their cropping system and their orientation in terms of conventional or organic management (Table 1). The main agricultural activity is irrigated rice production that can take place in the four main soil types of the region. Deep soils are sandy or loamy-clay soils, sandy soils being less favorable for rice cultivation due to difficulty to maintain water in highly draining soils. Shallow soils are clay loamy or salty and hydromorphic soils. Both require a quite high frequency of rice cultivation (one year over 3 at minimum in salty and hydromorphic soils, to desalinate and allow the production of rainfed crops).

Table 1: Types of farm and their description as well as the area represented at regional scale and their contribution to the rice production in the region.

TYPE	Brief description	Number of farms/ area concerned at regional scale (ha)	Area of rice at regional scale (ha) and percent of rice production represented
Specialized large size rice producer	Farm size > 265 ha. Rice surface > 80%	10 / 4205	3365 / 16%
Specialized middle size rice producer	Farm size < 265 ha. Rice surface > 80%	40 / 5173	4138 / 20%
Large size rice producer	More than 60% of their surface under Rice, the rest in durum wheat, more than 276ha	8 / 3037	1822 / 9%
Middle size rice producer	More than 60% of their surface under Rice, the rest in durum wheat, less than 276ha	32 / 4303	2582 / 12%
Partially organic rice producer	Same land use as middle size rice producer but an average of 20% of LU in organic	14 / 5640	3867 / 18%
Livestock breeder	Around 35% of rice, 35% of forages and 30% of other crops	13 / 2902	1016 / 5%
Organic livestock breeder	Same land use as livestock breeder but with partial or total area in organic	19 / 5469	1737 / 9%
Diversified crop producer	More than 50% of durum wheat and other crops, an average of 35% of rice	42 / 5142	1800 / 9%
Organic diversified crop producer	Same land use as diversified crop producer but with partial or total area in organic	8 / 1030	361 / 2%
	TOTAL	186 / 36 905ha	20 865ha / 100%

For the evaluation of scenarios a large range of cropping activities were defined and quantitatively described. Taking into account nine basic crops grown in Camargue and pastures and an equal number of preceding crops, managed under conventional and organic techniques in four different soils and two levels of intensity. Due to the too few references of OF in the region, only one intensity level was described for organic crops, we obtained 1200 possible agricultural activities. These agricultural activities were quantified in terms of their contribution to the indicators at different scales. For example, to calculate the volume of fresh water entering the delta, each of the 1200 activities was described in terms of water used for irrigation.

Inputs for the different activities (fertilizers, pesticides, seeds, machinery) were calculated based on several technical reports from the region, more of 20 reports of student interviewing farmers and a series of interviews to key farmers to complete the data (LeQuere, 2010). Labor demand was quantified from a detailed database constructed on the basis of these data that described precisely each cropping system with tractor and machinery use and the time needed for each operation as well as the period or realization. Yield for rice was estimated based on a database analysis containing more than 350 fields surveyed in different years (Delmotte *et al.*, 2011). Yield for other crops was estimated together with experts from local technical institutions and from average yields reported for the region. Reduction factors were introduced in relation to the availability of water for the different soil types and average reduction of yield under organic agriculture when detailed data or expert knowledge was not available. For the calculation of economic indicators, average prices of inputs declared by inputs suppliers and crop prices declared by the cooperative from 2009 and 2010 were used. The subsidies details and amount were averaged from farmers interviews.

3. APPLICATION OF THE THREE APPROACHES TO THE CAMARGUE CASE STUDY

In this section an application of the three types of modeling approaches is presented to explore scenarios related to the conversion to OF in Camargue. First the most probable spots for change are

identified by a LUC, then the plausibility of OF conversion is explored by means of BEM, and, finally, different pathways in the transition towards OF are analyzed using the ABM.

3.1 Probable spots of change to OF in Camargue, a retrospective analysis (LUC).

Land use change models may help to identify the most probable fields and farms to be converted to organic farming based on past trends of conversion in the Camargue region.

A shared vision among agronomist working in the Camargue is that converting to organic farming implies the lengthening of the crop rotation and the consequent reduction of the area devoted to rice to avoid weed pressure (Delmotte *et al.*, 2011). Not all soils in Camargue are equally suitable for this conversion as shallow soils might present salinity problems after few years of rainfed crops. As different farm-types have different soil-type distribution, it is possible to elucidate by the intensity of rice within the crop rotation the most probable soil-types and farm-types to be converted to OF in the future.

A land use and land use change analysis was conducted using a geo-referenced data set on the soil occupation for eleven years (1998-2009) at sub-regional scale (central island of Camargue) and observing (i) the change in the proportion of rice production at the farm scale for each farm type and (ii) the frequency of rice over the eleven years for each field in relation to the soil type. The land use data were crossed in a GIS (MapInfo®) with the spatial typology to get data at different scales: field, farm, farm-types and region. At all, 9130 fields are described in this data base.

Figure 2-A shows the evolution of the proportion of surface devoted to rice production per soil type. At the sub-regional scale, it can be seen that rice production does not occur with the same frequency on the different soils. Fields with shallow soils are the most cultivated lands in rice, as between 45 and 55% of the area are cultivated on rice each year. About 37% of the alluvial hydromorphic fields were cultivated on rice in 1998, however it has increased up to nearly 48% in 2008, this level being close to the one of shallow clay loamy soils. It can be seen that the deep loamy clay soils have in 2008 a slightly lower frequency of rice than shallow clay loamy soils and salty and hydromorphic soils, while deep sandy soils are always managed with lower rice frequency.

Farmers therefore seems to have a different management strategy for shallow and deep soils, rice being preferably allocated to shallow soils, most likely due to salt issues. To convert to OF, fields with shallow clay loamy soils and salty and hydromorphic soils would certainly have more difficulties and consequently, farmers with a high proportion of these types of soils, will also face problems converting to OF.

Figure 2-B shows the evolution of the percentage of fields cultivated on rice for the 9 farm-types described in table 1. First of all, it has to be noticed that the typology, which was done on an independent data set, is validated by this figure: livestock breeders have lower rice proportion in the farm area than diversified crop producer (either organic or conventional) and than rice producers or specialized rice producers. Both systems totally in organic (livestock breeders and diversified crop producers) have a stable rate proportion of rice, that is always lower than 0.5. However, partially organic rice producers have a proportion of rice that is not different than the proportion of non-organic rice producers. This corresponds to the partial conversion (e.g. 20%) of the farm area into organic.

Conversion to OF therefore seems to be possible in two ways: attaining a lower rice proportion in land use, the situation of diversified crop producer, or converting only a part of the farm to OF as shown by the partially organic rice growers that keep high proportion of the farm into conventional management.

Figure 2-C represent all farms on the basis of the standard deviation of the percentage of rice (X axis) to identify the variability of this production in the farm, in relationship to the deviation between the average of 1998-2005 and the average of 2006-2008 (Y axis).

Figure 2-C can be interpreted by grouping the farms. In the “stable” group are farms that have low variation of area devoted to rice (low standard deviation), meaning that the production is quite stable. In the “variable” group are farms with neither clear decrease nor increase in surface under rice but

there is a high standard deviation (the difference between 2006-2008 and 1998-2005 is low). Finally, two groups have interesting trajectories for the question of conversion to OF: the group of farms labeled “increase” is characterized by a positive difference between 1998-2005 and 2006-2008. These farms mainly belong to the types of “specialized rice producer” and of a “rice producer”. Their trajectories of increasing the proportion of rice in the farm does not seem to be favorable to a future conversion to OF. The farms contained in the group “decrease” have a trajectory of decline of area for rice production. These farms belong to the “rice producer” type and to the “diversified crop producer” that have been decreasing the rate of rice production in the last ten years, and therefore seem more prone to be converted to OF.

Applying this approach to Camargue agriculture therefore showed that using farm typology and retrospective land use analysis helps in identifying different tracks for OF development:

- Farms, independently of the farmers’ strategies, have different facilities to convert to OF due to their soil-types repartition, and diversified crop producers and livestock breeder, due to their current low rice proportion, could convert more easily than other farm-types with high frequency of rice.
- Inside a farm type, different farms have followed different trajectories in the last ten years that reinforced the ability or inability of different farm to convert.

These results raised the need to focus on two main types of farm (that are not yet converted) to evaluate the potential for OF conversion in the region:

- The “rice producer” farms that represent 15% of the area of the region, among which some are in a trajectory of rice production reduction, what could be favorable conditions for OF conversion.
- The “livestock breeder”, that have a low rice production rate, and that are yet in low decrease of rice production trajectory, however they only represent 2% of the area.
- The partial conversion to OF of specialized rice producer or rice producer should be considered as a more probable track of change for these two types of farms as it allow growing organic rice while not modifying too strongly the land use at farm scale.

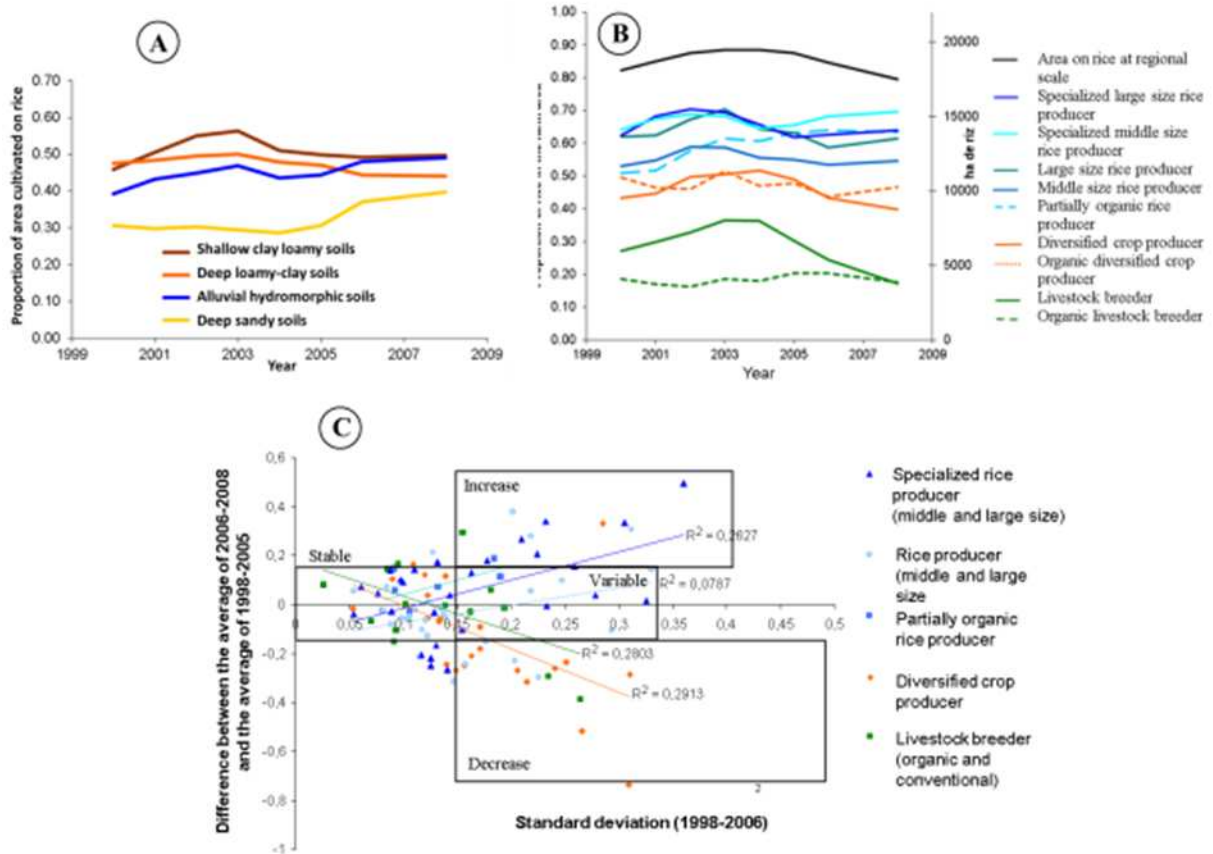


Figure 2: A. Three year averages of the proportion of rice fields per soil type at the regional scale. B. Three years average of the proportion of rice fields for the 9 types of farm. C. Identification of four main types of trajectories of land use evolution at farm scale. Refer to the text for more explanations.

3.2 Plausible scenarios for OF in Camargue (BEM)

Applying a BEM for evaluating scenarios related to the extension of OF in a region can be done in several ways. For this application to Camargue, two models were developed: one at the farm scale and one at the regional scale. In both models all indicators can be either maximized or minimized depending on the objectives of stakeholders at different scales. Also, indicators can serve as constraints for the optimization.

We choose 12 indicators relevant to the main environmental and economic issues of agriculture development in Camargue, from farm to regional scale (Table 2).

Table 2: Selected indicators for scenario evaluation.

Indicator	Scales
Total cost of production (€)	Farm
Gross margin (€)	Farm
Inputs cost over total cost of production ration	Farm
Level of subsidies (€)	Farm, region
Proportion of subsidies in the gross margin	Farm
Labor demand (h or man year)	Farm, region
Area in organic farming (ha)	Farm, region
Proportion of organic farming	Farm, region
Proportion of irrigated area	Region
Water volume for irrigation (m3)	Region
Treatment frequency index	Farm, region
Total production of each commodity (tons)	Region

In BEM using MGLP, Lopez-Ridaura (2005) has identified 3 main types comparative analysis of scenarios to explore future de strengths and weaknesses of future developments by: (i) changing the indicator to be maximized or minimized, for example maximizing the value of production vs. minimizing the use of pesticides (ii) changing the activities used for the maximization of certain indicators and therefore comparing different technical alternatives by changing the technical coefficients (iii) changing an external parameter of the model such as the price set for certain commodities or the level of subsidies for one particular crop. The results presented here correspond to the second type of scenario as we alternatively optimize the systems with either conventional or organic activities to calculate the indicators.

Figure 3–A presents a radar graph with 6 important indicators for a 'specialized rice producer' farm (see table 1) when the gross margin is maximized with conventional and organic activities, as well as under the current situation. Being the outer circle of the radar the best values for each indicator, it can be seen that organic and conventional activities provide similar value of gross margin, costs, subsidies and labor. Water used in the current situation is similar to that under organic production (in both cases less water used than in the conventional optimization) but in terms of pesticide use, it can be seen that reduction of pesticides used can be achieved without scarifying much gross margin or even improving it at the same time.

Compared to the current situation, it can be seen that gross margin can be nearly doubled with both conventional and organic production forms however, it has to be taken into account that the MGLP is optimizing a single year and most land is under irrigated rice and rainfed cereal production (sorghum or maize or wheat) with an important proportion under rice while in the current situation other crops are inserted in the rotations. In other words, to reach such level of productivity in both the organic and conventional scenarios, in previous and/or following years a decrease in productivity can be expected. In figure 3-B two contrasted scenarios are maximizing the value of agricultural production at regional scale with either conventional or organic production. While the conventional scenario shows marginally better values of agricultural production and employment, the optimization with organic activities uses less than half the water used with conventional activities and a decrease in the subsidies needed to support agricultural activities. In the conventional scenarios, rice is chosen as the main crop (67 %) which implies high mechanization level of agriculture and a consequent increase in labor demand (employment) and higher fuel consumption.

Water used in the region plays a crucial role in the ecological functioning of natural wetlands as too little of it might result in an increase in the salt concentration and too much of it might, besides decreasing the salt concentration in the water, increase the water level of the central Vaccares lagoon.

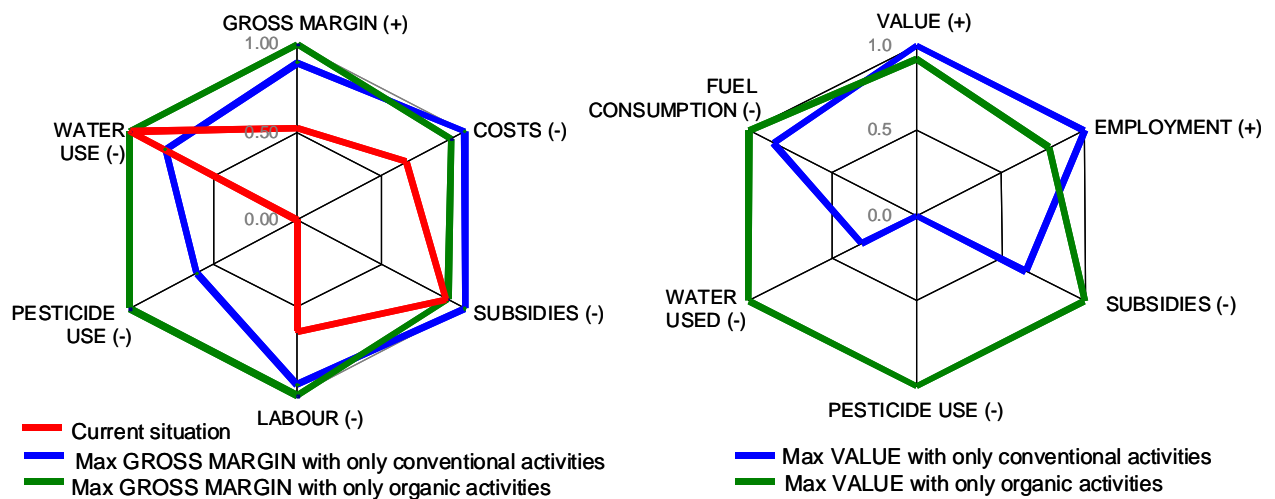


Figure 3. A: Current situation for a middle size specialized rice producer and under scenarios of maximization of gross margin with conventional and organic activities scenarios. B. Scenarios of maximizing value of production in Camargue with organic and conventional activities.

3.3 Conversion pathways to OF (ABM)

We developed an ABM to test different strategies of conversion to OF and evaluate the impact at the farm and regional scales (Delmotte *et al.*, Submitted-b). This ABM, developed under the Cormas® platform (Bousquet *et al.*, 1998), was designed for interactive simulation with farmers and results shown here were obtained during test applications carried out with university students in agronomy). The ABM is based on individual interfaces for each farm type and each participant represented a farmer of a defined farm type having specific resources in terms of farm size, soil type distribution and initial condition of cropping system.

Each participant decided which agricultural activity to allocate in each field, its decision concerned the choice of crops, style of production (conventional or organic) and the level of inputs for each field (See Table 5). Each participant had also to consider the total area of each crop on a given year at the farm scale and the preceding/following crop couple at the field scale in order to keep coherent rotations.

The interactive simulation was conducted for 7 time steps, a time step corresponding to a year. Students had the objective to convert partially and totally their farm to OF while maintaining as much as possible their gross margin and the labor demand at the farm scale. During the 2 year conversion period to organic farming input and outputs for organic activities were used while conventional prices of production were used.

Once choices were made by each player for a time step, indicators were calculated at farm and regional scale. In Figure 4-A the evolution of gross margin is shown for two different farm-types, a middle size rice producer and a livestock breeder. It can be seen that for the livestock breeder there is little effect of conversion to OF, the gross margin being quite stable along the simulation.

For the specialized large size rice producer, it implied the diversification of production and therefore a reduction in the surface devoted to rice. At the end of the simulation, this type of farm will possibly reach higher gross margin value as, once the transition period has ended the prices of organic products and subsidies for maintaining OF are used for the calculation of gross margin. In figure 4 B, the evolution of the gross margin of the rice producer is presented as well as the evolution of water use. OF can help to maintain satisfying gross margin while reducing the water use.

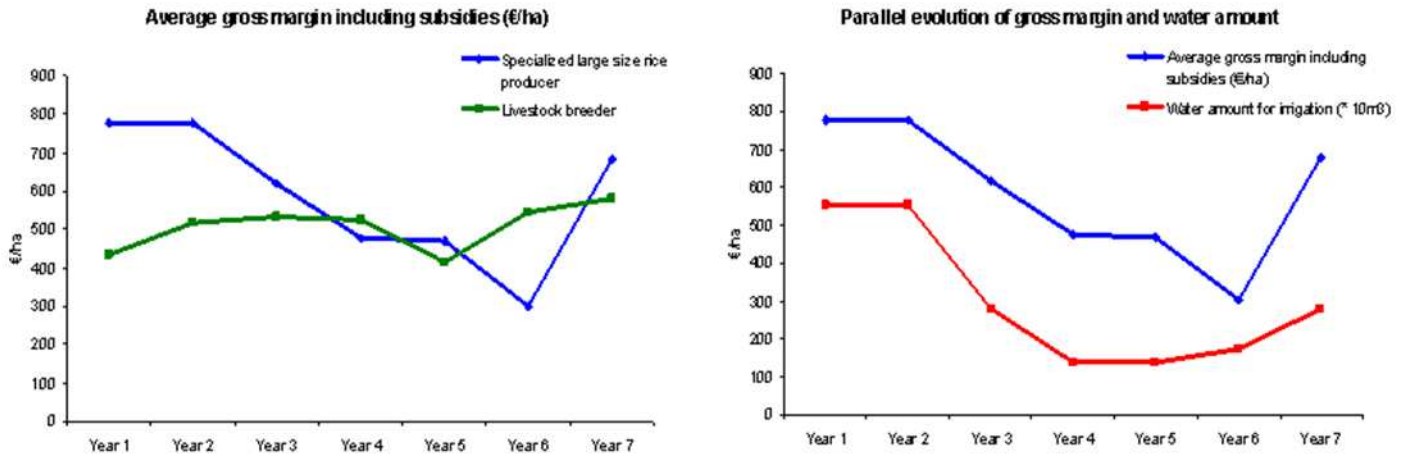


Figure 4. A. Simulation of the evolution of gross margin for two different farm-types and the proportion of land under OF. B. Evolution of gross margin and water use for irrigation in a middle size rice producer.

Applying this ABM allowed to identify that different farming structures have different capabilities to convert to OF. The conversion of *the specialized large size rice producer* implies in the first year of conversion a reduction of the gross margin, even if the conversion is supported by a subsidies of 150€ per hectare as it was the case in the simulation. The livestock breeder, with a margin being less dependent on rice and having more crop diversity in the farm is less impacted.

5 DISCUSSION AND CONCLUSIONS

5.1 Regional conversion to OF: probable changes, plausible futures and possible trajectories.

The rapid growth of organic agriculture in the last decade suggests that this form of farming could become a prototype for agricultural development: the larger the proportion of land organically farmed the closer the idea of considering a regional conversion to Organic Farming.

This regional conversion to organic farming might represent great advantages in terms of ecosystems integrity and local natural resource conservation as those concerns often arise at that scale. Economically, it might represent an opportunity for satisfying specialized “niche” markets.

But in a specific case, like Camargue, is this regional conversion possible? What would be the effects of such conversion on the performance of the farms in terms of production and economic profitability? What could be the consequences at regional scale in terms of social and economic development as well as nature conservation? Taking into account the heterogeneity of farms and farming systems in the region, are there farmers more prone to conversion and others facing great obstacles? Are possible trajectories of conversion as diverse as farms themselves?

In this study we have showed three approaches that might contribute to shade light into these questions. The three approaches were applied to the extension of OF in the Camargue region, South of France. These approaches answer to different and complementary interrogations related to the regional conversion to organic farming.

The LUC model, allowed us to identify the most probable spots for conversion in Camargue. By analysing the past trends of farming systems in Camargue, livestock breeders with high proportion of shallow clay loamy soils and salty and hydromorphic soils (mainly under pasture); and diversified cereal producers are the farm-types more prone to switching to organic cropping systems due to suitable combination of soil types and farming orientation to lengthen the rice rotation. Specialized and non-specialized rice producers might restrict themselves to a partial conversion to OF in specific fields with suitable soil types.

The main trend of conversion in the near future will, most likely, take place in deep soil of farms with low proportion of rice in their cropping systems. However this expected change only concerns 20% of the arable land of Camargue. Other farmers such as the specialized rice producers and rice producers with a fair proportion of shallow clay loamy soils and salty and hydromorphic soils, and representing 45% of the arable land of the region, would see conversion as a much more difficult task. Or at least, it seems improbable to see a spontaneous (versus assisted) conversion to OF in the near future.

Methodologically speaking, this is an original application of LUC as it is normally applied at higher aggregation levels and farm households are often not included in the analysis (Delmotte *et al.*, Submitted-c). However, the development of organic farming in a specific region might be driven, not only by the biophysical conditions (or socio-economic resource endowment of farm), but also by the farming practices, style and convictions.

The BEM model allowed us to explore options in what could be called plausible futures (van Ittersum *et al.*, 1998). It also allowed us to calculate several indicators for multicriteria analysis of scenarios revealing some of the trade-offs among indicators if total conversion to OF. The total conversion of the region to OF is plausible. With current prices, the region would not lose in terms of economic productivity by converting to OF and at the same time, it would protect the environment from the potential harmful effects of pesticides (Comoretto *et al.*, 2007; Höhener *et al.*, 2010). However the required extensification of cropping systems (i.e. less rice in the rotation) will plausibly have negative effects on the employment generation in the sector. Also the volume of fresh water that it is pumped into the delta might decrease with possible effects on the level and salinity of the central lake and on the conservation of the wild habitat of fresh water species.

With the BEM, trade off curves can be quantitatively described by maximising one indicator while setting another one as constraint and progressively relaxing it (Lu *et al.*, 2004; Lopez Ridaura, 2005b). Such curve might help to better understand the trade-off between productivity and volume of water used in relation to the regional conversion of Camargue to OF and identify an optimal solution where both objectives are simultaneously satisfied. However, non-linearities related to the spatial distribution of fields under irrigated rice in the region and their interaction, which governs the volume of water that actually enters the lake, might not be captured by this approach and other types of modelling would be needed such as agent-based modelling.

The ABM model presented here was developed for interactive simulation to elucidate the possible trajectories towards conversion to OF. In the participative exercise presented here, it can be seen that the transition to OF by farms specialized in rice production is much harder than for other types of farms, confirming what was seen in the LUC model. However, following the trajectory of conversion, it can be seen that after several years, the profit of this kind of farmers can almost be recovered (confirming the results of the BEM at the farm scale). These results suggest that conversion to OF for these types of farms may not come spontaneously and greater support might be needed, at least during the conversion phase.

Our current actions related to the development and use of the ABM are directed:

- To the organisation of participatory session of interactive simulation with farmers related to the conversion of OF to have a more realistic picture of the trajectories they would take. In this case, because farmers were engaged in other scenarios using the ABM related to the 2013 EU-PAC reform (Delmotte *et al.*, Submitted-b), agronomy students (future farmers, policy makers, researchers or technical advisors) were asked to participate in the interactive simulation session.
- Towards the inclusion of a spatially explicit water balance calculation (Chauvelon, 1998; Chauvelon *et al.*, 2001; Chauvelon *et al.*, 2003) to capture the non-linearities mentioned above.

5.2 Conclusions

The application of the three approaches provided the following learning: the regional conversion to OF in Camargue is plausible, the most probable spots for change in the near future are fields with enough drainage to avoid salinization problems from livestock breeders and diversified cereal producers and, finally, the possible trajectories of conversion suggest that certain farmers (specialised in rice production) might need greater help to assure such conversion to OF as their economic performance is hampered during that period.

Methodologically speaking, the simultaneous application of these three approaches to explore the same scenario in one region revealed their complementarities for tackling a complex issue such as the regional conversion to OF from different angles: the LUC model provided information about the most probable spots of change, the BEM allowed to explore different futures and to evaluate their plausibility, while the ABM focus on possible trajectories to attain a given objective. The use of these tools in a participatory manner with local stakeholder might certainly contribute to the common reflection and possibly to the development of joint action to encourage such conversion to OF and assure an economically efficient agriculture while reducing its possible environmental impacts.

Acknowledgments.

We would like to acknowledge the financial support of the French Environment and Energy Management Agency (ADEME) and the Internal Committee for Organic agriculture (CIAB) of the National Agronomic Research Institute (INRA) to conduct this research, the students of Montpellier SupAgro and ENSAIA Nancy who participated to the interactive simulation, and finally Servane Penvern for her useful comments on an early draft of this manuscript.

The references related to this paper are with the main list of reference of this thesis.

Abstract

Agricultural systems are constantly evolving driven by technical and organizational innovations and changes in their socio-economical context. At regional scale local stakeholders can encourage and accompany foreseen changes if they can have clear visions of their potential impacts. The objective of the PhD thesis was to develop and test a framework to assist farmers and local stakeholders of a region in the building and assessment of scenarios related to agricultural systems. This framework is based on different modeling approaches for a participative, integrated, multi-scale and prospective assessment of agricultural systems. It was implemented in the Camargue region, South-East of France, with cereal farmers and local stakeholders involved in agricultural production and territorial management.

Scenarios assessed were related to the reform of the common agricultural policy (CAP) of the European Union in 2012-2014, and to national objectives of reduction in pesticide use and extension of organic farming (OF). Several data and expert knowledge have been formalized and used in these simulations of scenarios. Two modeling tools have been used for scenario assessment with stakeholders: an agent-based model allowed interactive simulation sessions with farmers, and a bio-economic model was co-developed and used with local stakeholders such as the French Union of Rice Producer and Industry and the Regional Natural Park, both important stakeholders influencing local agricultural systems.

Assessing scenarios related to the CAP reform showed the strong dependency of rice farms to EU subsidies. Farmers involved in the sessions tested several adaptation strategies for their farms in response to the disappearance of the rice coupled payment. These strategies often implied a diversification of production and/or the conversion to OF, but they did not allowed to compensate the economic loss due to the suppression of the rice coupled payment. At the regional level, these strategies would lead to an important decrease on the area cultivated with rice, and therefore have an impact on other related activities in the region. Diversification of production is also a key strategy in scenarios related to governmental objectives of reducing pesticide use and conversion to OF. Therefore, in Camargue, there is room for maneuver for conciliating environmental and economic objectives related to agricultural production.

This thesis proposed and applied a framework for participatory integrated assessment of agricultural systems. This framework associates closely farmers and other stakeholders in all phases of scenario assessment (scenario definition, data gathering and analysis, the building and use of models). The way different modeling tools are used in this framework could contribute for collective assessment of future farming systems and support collective actions for sustainable agricultural development.

Keywords

Agricultural systems, scenario, participatory, multi-scale, integrated assessment, prospective, agent-based model, bio-economic model, stakeholders, farmers, Camargue.

Résumé

Les systèmes agricoles sont en constante évolution sous les effets conjugués d'innovations techniques et organisationnelles et de changements du contexte socio-économique. A l'échelle d'un territoire, des acteurs locaux peuvent encourager et accompagner des changements de ce type s'ils ont une vision claire de leurs impacts potentiels. L'objectif de cette thèse est d'élaborer et d'appliquer une démarche permettant d'assister agriculteurs et autres acteurs locaux d'un territoire dans la construction et l'évaluation de scénarios d'évolutions des systèmes agricoles. Une démarche basée sur des approches permettant une analyse prospective, multicritères, multi-échelles et participative d'évaluation des systèmes agricoles a été développée. Elle a été mise en œuvre en Camargue (sud-est de la France), avec des exploitants céréaliers et des acteurs de la production agricole et de la gestion du territoire.

Des scénarios portant sur la réforme de la politique agricole commune (PAC) en 2012-2014, ainsi que sur des objectifs nationaux de réduction de la consommation de pesticides et de développement de l'agriculture biologique ont été développés. Ces perspectives d'évolution des systèmes agricoles camarguais ont été évaluées, via la formalisation de nombreuses données et connaissances. Deux outils de modélisation ont été utilisés : un modèle multi-agent a permis la mise en place de séances de simulation interactives avec des agriculteurs, et un modèle bioéconomique a été développé et utilisé avec des acteurs locaux tels que le syndicat des riziculteurs et le parc naturel régional.

Les scénarios portant sur la réforme de la PAC ont confirmé la dépendance des exploitations rizicoles aux subventions. Des agriculteurs ont testé différentes stratégies d'adaptation de leurs exploitations à la suppression de l'aide couplée à la production rizicole. Ces stratégies, souvent basées sur la diversification des activités ou sur la conversion à l'agriculture biologique, ne permettaient pas de compenser les pertes économiques liées à la disparition de l'aide couplée. A l'échelle du territoire, ces stratégies réduiraient fortement la surface cultivée en riz, avec des impacts importants sur d'autres activités en lien avec la production agricole. Cependant ces stratégies vont dans le sens des objectifs gouvernementaux de réduction des impacts de l'agriculture sur l'environnement. Des scénarios portant spécifiquement sur ces objectifs ont permis d'identifier des marges de manœuvre importantes au niveau des exploitations céréalières camarguaises.

Cette thèse propose un cadre pour la mise en œuvre de démarches d'évaluation des systèmes agricoles dans un territoire, qui associe les agriculteurs et les acteurs locaux à différentes étapes, depuis leur engagement pour le choix des scénarios, l'acquisition et l'analyse des données, la construction des outils de simulation et l'évaluation de scénarios. La combinaison de différents outils de modélisation pour la réalisation de réflexions collectives, pourrait contribuer à la mise en place d'actions pour un développement durable de l'agriculture.

Mots-clés

Systèmes agricoles, scénarios, participatif, multi-échelle, évaluation intégrée, prospectif, modèles multi-agents, modèle bioéconomique, acteurs, agriculteurs, Camargue.