



Université
de Toulouse

THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par :

Institut National Polytechnique de Toulouse (INP Toulouse)

Discipline ou spécialité :

Agrosystèmes, Écosystèmes et Environnement

Présentée et soutenue par :

M. CLÉMENT MURGUE

le mercredi 17 décembre 2014

Titre :

QUELLES DISTRIBUTIONS SPATIALES DES SYSTEMES DE CULTURE
POUR LIMITER L'OCCURENCE DES CRISES DE GESTION
QUANTITATIVE DE L'EAU? UNE DEMARCHE DE CONCEPTION
EVALUATION SUR LE TERRITOIRE IRRIGUE DE L'AVEYRON AVAL.

Ecole doctorale :

Sciences Ecologiques, Vétérinaires, Agronomiques et Bioingénieries (SEVAB)

Unité de recherche :

AGroécologie, Innovations, TeRritoires (A.G.I.R.)

Directeur(s) de Thèse :

MME DELPHINE LEENHARDT

M. OLIVIER THEROND

Rapporteurs :

M. MARC VOLTZ, INRA MONTPELLIER

M. MICHEL ETIENNE, INRA AVIGNON

M. OLIVIER BARRETEAU, IRSTEA

Membre(s) du jury :

M. CLAUDE MONTEIL, INP TOULOUSE, Président

M. JACQUES WERY, MONTPELLIER SUPAGRO, Membre

Mme DELPHINE LEENHARDT, INRA TOULOUSE, Membre

M. OLIVIER BARRETEAU, IRSTEA, Membre

M. OLIVIER THEROND, INRA TOULOUSE, Membre

Résumé

Dans les territoires irrigués exposés aux crises de gestion quantitative de l'eau, la sévérité des étiages dépend des interactions entre systèmes de culture, situations pédoclimatiques, hydrologie, lâchers d'eau et restriction d'irrigation. Dans de nombreuses situations, l'absence de nouvelles solutions de stockage et les tensions entre gestionnaires et usagers de l'eau rendent nécessaire la planification **des étiages**. Mes travaux explorent le potentiel de « la gestion spatiale » de l'eau pour mettre en adéquation la **dynamique des prélèvements** pour l'irrigation avec celle de l'offre en eau disponible (naturelle et stockée). Je propose une **méthodologie participative de conception-évaluation d'organisations territoriales des activités agricoles**, déployée sur l'aval du bassin versant de l'Aveyron (800 km²), en trois étapes: (1) modéliser le système socio-agro-hydrologique, (2) concevoir des alternatives de distribution spatiale des systèmes de culture, (3) conduire une évaluation intégrée des alternatives face à la variabilité climatique observée. Ces travaux combinent des **méthodes, connaissances et outils « hard and soft »**, et font usage de la plateforme de simulation multi-agents **MAELIA**. Le processus a permis de formaliser des visions d'acteurs et de poser les bases d'une concertation multi-acteurs. Cependant la simulation des impacts de ces alternatives a montré leurs limites pour régler le problème de déficit structurel en eau. Cette démarche pourrait être prolongée pour aboutir à des propositions opérationnelles.

Mots clefs : Agronomie du territoire, système socio-écologique, paysage agricole, gestion spatiale de l'eau, méthode participative, connaissance hybride, modélisation intégrée, modélisation multi-agent, modèle de comportement d'agriculteur

What alternative cropping systems spatial distributions to limit the risk of quantitative water management crises? A design and assessment method for an irrigated landscape in the lower reaches of the Aveyron River

Abstract

In irrigated landscapes exposed to quantitative water management crises, the intensity of low flows depends on interactions between cropping systems, soil and climate conditions, hydrology, water releases and withdrawal restrictions. In many situations there are no opportunities for more water storage, thus tensions occur between water managers and users, which makes necessary the planning of water demand dynamics. My work explores the potentials in the "spatial management of water" to align the **water demand dynamics** with natural and stored water availability. I present a 3 step, participatory method to design and assess agricultural landscapes: (1) model the Social-Agro Hydrological system, (2) design alternative spatial distributions of cropping systems, (3) carry an integrated assessment of those alternatives based on observed climatic variability. This method combines "**hard**" and "**soft**" **methods, knowledge and tools**, and uses the **MAELIA** multi-agent simulation platform. The method tested in the downstream area of the Aveyron River (800 km² Southwestern France). It allowed the formalization of actors' visions on alternative distributions of cropping systems. However, simulations of those alternatives indicated that they could not easily solve the water deficit issue. The method could now be enhanced to reach operational proposals.

Keywords: Landscape agronomy, socio-ecological system, agricultural landscape, spatial water management, participatory approach, hybrid knowledge, integrated modeling, agent-based modeling, farmer behavior model

Sous la direction de Delphine Leenhardt et Olivier Therond

UMR AGIR - Unité Mixte de Recherche AGroécologie Innovations teRritoires - 24, chemin de Borde-Rouge CS 52627 F-31326 Castanet Tolosan Cedex France - +33(0)5 61 28 53 70

Sommaire

Résumé.....	i
Abstract.....	i
Sommaire.....	ii
Remerciements.....	iv
Soutiens financiers.....	v
Listes d'article et de communications réalisés au cours du doctorat.....	vi
Avant-propos.....	viii
Acronymes et sigles.....	x
Introduction générale : Stratégies pour l'eau.....	1
Partie I:Présentation du projet de thèse.....	3
Le pourquoi du projet de thèse.....	4
Le projet de thèse.....	13
Partie II (Articles): Les étapes de la démarche de conception évaluation.....	29
Etape1: Hybridizing local and generic information to model cropping system spatial distribution in an agriculture.....	30
Etape 2: Towards integrated water and agricultural land management. Participatory design of agricultural landscapes.....	53
Etape 3: A fine scale simulator of social-ecological system: impact assessment of cropping systems on water management.....	72
Partie III : Discussion.....	93
Quelle connaissance scientifique?.....	94
Quelle applicabilité des connaissances?.....	101
Conclusion générale.....	104
Bibliographie.....	106
Table des Illustrations.....	116
Tables des matières.....	118
Annexes.....	123

Remerciements

J'ai eu la chance de côtoyer de nombreuses personnes au cours de mon doctorat, et beaucoup ont contribué à son aboutissement. Je remercie en premier lieu ma directrice de thèse Delphine Leenhardt et mon encadrant Olivier Therond pour avoir créé cette opportunité et pour avoir cru en moi du début à la fin. Merci pour leur aide, savant dosage de confiance et de suivi. Merci Delphine pour le partage de ton expérience du monde de la recherche, et pour avoir essayé de m'enseigner qu'une chose compliquée est toujours mieux expliquée simplement. Merci Olivier pour ta disponibilité d'abord, tes idées bien sûr, ton humilité, ton ouverture d'esprit, et tes conseils avisés.

Je remercie les membres de mon comité de thèse et de mon comité de suivi, spécialement messieurs Marc Benoît et Ludovic Lhuissier pour leurs disponibilités et l'intérêt qu'ils ont montré. Merci aux participants de mes divers ateliers et entretiens d'avoir accepté de se prêter au jeu, particulièrement Messieurs Frédéric Beaufiles, Francis Bourges, Alain Batut et Yves Delamarre. Un E-N-O-R-M-E merci à Madame Vorlette Nuttinck et Monsieur Claude Chochon, de la DDT 82, sans qui il n'y aurait que des parcelles, pas de points de prélèvements, pas de barrage, pas de lachers. J'ai trouvé chaque instant de nos collaborations efficaces et agréables. Merci à Jonas Hipolito pour son travail, sa bonne humeur et sa volonté qui ont mis ma thèse sur la bonne voie.

Merci à l'INRA de m'avoir permis de réaliser mon doctorat dans de très bonnes conditions. Je veux remercier tous les membres de l'UMR AGIR, notamment celles et ceux qui m'ont assisté dans les aspects logistiques et administratifs, particulièrement Marina, Christel et Mathieu. Je remercie celles et ceux qui m'ont écouté, relu, critiqué, bref qui ont enrichi mon travail de manière informelle ou formelle, et particulièrement Magali Willaume, Julie Constantin, Jacques Eric Bergez, Eric Justes. Je remercie aussi mes collègues et amis qui m'ont supporté et diverti quotidiennement : André, Sarah, Damien, Camille, Grégory. *La rédaction, c'est la fin des ambitions (M. Moraine, 2014)* Marc Morainus, merci pour ta bonne humeur permanente et pour tous les services rendus durant ces trois années. Le plus grand étant certainement l'achat de cette plancha électrique sans laquelle je ne serais pas aussi heureux aujourd'hui. Bon courage cher collègue et ami, Rock and Roll.

Vous êtes si différents mais il faut vous remercier ensemble car votre contribution se vaut : elle est COLOSSALE. Maroussia, Pierre et Romain, sans vous il n'y aurait rien. Collègues et amis, votre « pouvoir » informatique m'intrigue. J'admire votre patience pour mes problèmes d'agronomes et vous dois à tous les trois une fière chandelle. Maroussia bon vent, j'espère que tu n'auras plus à semer du maïs ou lâcher de l'eau, et que tu auras de nombreuses occasions de lâcher tes manettes pour grimper des montagnes. Pierre, cher ami, tu es mon maître de SQL, je propagerai ta sagesse partout où j'irai. Romain, un grand merci pour tout ce temps passé à m'assister par sympathie et non par obligation, j'espère que nos collaborations futures pourront être aussi fructueuses.

Je remercie mes parents, qui m'ont appris à travailler dur sans jamais oublier de vivre, qui m'ont porté jusqu'ici et à qui je suis fier de dire : j'ai fait ça sans vous ! (Bon Ok, presque sans vous). Je remercie Christine et Remy qui ont souvent donné de leurs WE ou vacances pour que je puisse travailler au calme et me reposer.

Je tiens surtout à remercier Maud, qui m'a trouvé tout au début et apporté tant de bonheur au cours de ce projet. Merci pour ta patience toi qui étais déjà loin devant. Pour cette épreuve tu m'as conseillé, motivé, supporté, aidé, je n'en serais pas là sans toi. Mais surtout tu m'as fait une très très belle petite locomotive à finissage de thèse. Ma petite Salomé, merci à toi pour cette magnifique surprise qu'est ton arrivée, pour ton sourire qui m'a tracé une route bien éclairée jusqu'à la fin. Merci pour ces matinées enjouées et ces moments que tu as passés sur mon ventre mon dos, mes épaules, sur mon skate, si relaxants dans les moments difficiles de ce travail, absolument indispensables dans ma vie.

Soutiens financiers

Ce projet de doctorat a été effectué au sein de l'UMR AGroécologie, Innovations, TeRritoires (UMR 1248 AGIR, INRA-INPT/ENSAT & IE PURPAN). Il a été possible grâce au soutien financier des organismes suivants :

- L'INRA, au travers du méta programme Adaptation de l'agriculture et de la forêt au changement climatique (ACCAF)
- La région Midi-Pyrénées
- L'Agence de l'Eau Adour-Garonne

Je souhaite les en remercier particulièrement.



AGENCE DE L'EAU
ADOUR-GARONNE

ETABLISSEMENT PUBLIC DU MINISTERE
DU DEVELOPPEMENT DURABLE



Je souhaite aussi remercier la fondation RTRA STAE (<http://www.fondationstae.net/>) sans qui le projet MAELIA, qui a largement contribué au succès de mon travail, n'aurait pas existé.

Listes d'article et de communications réalisés au cours du doctorat

Publications scientifiques en premier auteur

Murgue, C., Therond, O., & Leenhardt, D. (2015). Towards sustainable water and agricultural land management: participatory design of social-agro-hydrological systems. *Land Use Policy*, 45, 52–63. doi:10.1016/j.landusepol.2015.01.011

Murgue, C., Therond, O., & Leenhardt, D. (2014 Submitted). Hybridizing local and generic information to model cropping system spatial distribution in an agricultural landscape. *Agricultural Systems*.

Murgue, C., Lardy, R., Leenhardt, D., & Therond, O. (Finalisation). Fine spatio-temporal simulations to assess the impact of alternative cropping systems spatial distributions on a Social Agro-hydrological system. *Environmental Modelling and Software*.

Autres publications scientifiques

Constantin, J., Willaume, M., Murgue, C., Lacroix, B., & Therond, O. (2015). The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 206, 55–68. doi:10.1016/j.agrformet.2015.02.011

Communications à des congrès scientifiques

Murgue, C., Lardy, R., Vavasseur, M., Leenhardt, D., & Therond, O. (2014). Fine spatio-temporal simulation of cropping and farming systems effects on irrigation withdrawal dynamics within a river basin. In D. P. Ames, N. W. T. Quinn, & A. E. Rizzoli (Eds.), 7th International Congress on Environmental Modelling and Software, June 2014, San Diego, USA.

Murgue, C., Therond, O., & Leenhardt, D. (2014). Participatory design of the spatial distribution of cropping systems to limit the risk of water crises: Can participatory modelling and design activities trigger collaboration between stakeholders to co-design new futures? In Resilience Alliance Science May 5th 2014, Montpellier, France.

Murgue, C., Therond, O., & Leenhardt, D. (2014). Agricultural viability in a water-deficit basin : can participatory modelling and design activities trigger collaboration between water management and agriculture stakeholders ? In H. Schobert, M.-C. Riecher, H. Fischer, T. Aenis, & A. Knierim (Eds.), 11th European IFSA Symposium: Farming systems facing global challenges: Capacities and strategies. Berlin, Germany.

Murgue, C., Leenhardt, D., & Therond, O. (2013). Conception participative et spatialisée d'alternatives de pratiques culturelles pour une gestion quantitative de l'eau territoriale. In *Dynamiques environnementales, politiques publiques et pratiques locales : quelles interactions ? Colloque international interdisciplinaire*. Toulouse, France.

Murgue, C. (2013). POSTER - Participatory design of cropping systems territorial distributions to limit the risk of water crises. In *Ecological Economics and Institutional Dynamics*. 10th biennial conference of the European Society for Ecological Economics. Lille, France.

Autres communications

Murgue, C., & Leenhardt, D. (2014). Communication sous forme de sketch: Co-conception d'alternatives de distribution spatiale de systèmes de culture (SdC) dans un bassin versant en déficit hydrologique. In *Journée scientifiques du département SAD, INRA, 8-10 janvier 2014 - section « BREVES DE SCIENCES : QUOI DE NEUF AU SAD ? »*. Sète, France.

- Murgue, C. (2014). Comment coordonner gestion de l'eau et gestion de l'espace agricole pour limiter les risques de crises de gestion quantitatives de l'eau ? In séminaire Gestion Intégrée des Ressources en Eau (GIRE) et Gouvernance Territoriale de l'Eau (GouTE). le 25 mars 2014. Castanet Tolosan, France.
- Murgue, C. (2014). Hybridation de savoirs d'acteurs et de bases de données pour décrire les systèmes de culture d'un territoire irrigué. In *Séminaire thématique de l'UMT eau: Connaître et modéliser les systèmes de culture d'un territoire dans un but de gestion quantitative de l'eau, Toulouse le 10 avril 2014*. Baziège, France.
- Murgue, C. (2012). Conférence grand public: La gestion quantitative de l'eau, enjeux et outils dans les territoires ruraux. In *Quand les sciences s'en mêlent - Préserver l'eau : quels outils pour demain ? décembre 2012*. Bibliothèque José Cabanis, Toulouse, France.

Avant-propos

Ce mémoire est composé de trois parties.

Une première partie présente mon projet de thèse, ses origines, ses objectifs, la démarche mise en œuvre et le terrain d'étude.

Une deuxième partie présente les articles soumis lors de la thèse, chacun devant être vu comme l'illustration d'une des étapes de ma démarche.

Une troisième partie propose quelques points de discussion qui n'auront pas ou peu été abordé dans les articles scientifiques.

Une liste d'annexe est aussi proposée. Pour bon nombre elles décrivent les choix de modélisation et les algorithmes développés pendant mon doctorat. Ces dernières doivent servir de référence aux personnes qui prendront la suite du projet MAELIA.

Acronymes et sigles

Français

AEAG : Agence de l'Eau Adour-Garonne

BAG: Bassin Adour-Garonne

CG: Conseil Général

DCE : Directive Cadre Européenne

DDT: Direction Départementale des Territoires

DOE : Débit objectif d'étiage

DREAL : Di

LEMA : Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques

MAAPRAT : Ministère de l'Agriculture, de l'Alimentation, de la Pêche, de la Ruralité et de l'Aménagement du Territoire

MEDDTL : Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement durable et de l'Aménagement du territoire

OUGC : Organisme Unique de Gestion Collective

PGE : Plan de Gestion de l'Eau

RPG : Registre parcellaire graphique

SAGE: Schéma d'Aménagement de l'Eau

SDAGE: Schéma Directeur d'Aménagement de l'Eau

SES : Système Socio-Ecologique

SI : Système d'information

SIG : Système d'Information Géographique

Vi : Volume Initial

Vp : Volume Prélevable

ZRE: Zone de Répartition des Eaux

Anglais

Alt: Alternative

CMS: Crop management Sequence

CS: Cropping System

CSSD: Cropping Systems Spatial Distribution

D&A: Design-and-Assessment

EEA: European Environmental Agency

GIS: Geographic Information System

LPIS : Land Parcel Identification System

LWAE: Law on Water And Aquatic Environments

MAELIA : Multi-Agents for Environmental norm Impact Assessment

MAM: Multi agent based model

NRM: Natrual Resources Management

SAH: Social Agro-Hydrological

SES: Socio-Ecological System

SWAT: Soil and Water Assessment Tool

UAA: Utilized Agricultural Area

WAE: Water and Aquatic Environments

WC: Water Content (soil)

Introduction générale

Stratégies pour l'eau : de la gestion de l'offre à la gestion de la demande

The future economic, social, and environmental costs of meeting the water needs of human populations and supporting economic development will depend on our ability to understand and manage water demands (Dziegielewski, 2003)

Le déficit en eau d'un hydrosystème, aussi appelé « sécheresse hydrologique », se définit relativement aux différents besoins humains et au système de gouvernance de l'eau en place (Mishra & Singh, 2010). Dans certains cas, c'est la remise en question des conditions d'utilisation de la ressource qui induit une situation de sécheresse hydrologique. Par exemple en Europe, la directive cadre sur l'eau (DCE, 2000/60/CE) a défini de nouveaux objectifs de conservation des milieux aquatiques qui se traduisent par la hausse des niveaux d'eau à maintenir dans les cours d'eau. Ce nouveau cadre réglementaire a fait émerger des situations de sécheresse hydrologiques qui n'avaient jusqu'alors pas existé, avec pourtant les mêmes niveaux d'utilisation.

En Europe, bien que la disponibilité naturelle et le stockage soient développés, les situations de déficit hydrique et de conflit sont communes (EEA, 2012).

Avant les années 1990, dans les sociétés dites industrialisées, les politiques de gestion de l'eau avaient essentiellement pour objectif d'adapter l'offre à l'augmentation de la demande et, par conséquent, se sont souvent traduites par des investissements importants dans le développement des infrastructures de stockage et d'acheminement de l'eau (Fernandez & Trottier, 2012). Ce mode de gestion est souvent qualifié de **gestion de l'offre** (*supply side management*). Il nécessite le développement d'équipements hydrauliques (*hydraulic paradigm*) (Kallis & Coccossis, 2003) et est associé à un mode de régulation centralisé par « commande et contrôle » (*command and control*) (J. Narcy & Mermet, 2003). Fernandez et Trottier, (2012), concernant les campagnes françaises dans les années 1950 et 1960, insistent sur l'influence des ingénieurs en charge de l'aménagement du territoire qui avaient souvent commencé leur carrière dans les colonies où les situations de pénurie d'eau étaient répandues. Ils soutenaient que le facteur limitant du développement économique des territoires ruraux était l'importance et la fiabilité des infrastructures hydrauliques. Ainsi ces auteurs expliquent que dans le Système Neste (Sud-Ouest de la France), des réservoirs ont été créés alors même que la demande ne les justifiait pas encore et que c'est l'existence de ces réserves, le besoin de les utiliser et une politique volontariste de développement de l'irrigation, qui ont conduit au développement important de cette dernière dans cette région. En parallèle, les Politiques Agricoles Françaises et Communales ont été un facteur déterminant du développement de l'irrigation après la seconde guerre mondiale et jusque dans les années 1990 (Fernandez et Trottier, 2012).

Cette période a été marquée par une remise en cause de ce modèle de gestion centralisée. Les débats se sont longtemps concentrés sur les moyens de rationaliser la gestion de l'eau, et plus spécifiquement sur l'opportunité ou non de passer d'une régulation par l'Etat (vision interventionniste) à une régulation par les marchés (vision néo-libérale) (Guy, 1996). Dans le même temps, les débats sur les impacts environnementaux et économiques liés à la construction de barrages et au développement des transferts d'eau entre bassins se sont fortement intensifiés (Dziegielewski, 1999; Gleick, 2003; World Commission on Dams, 2000). Les stratégies de **gestion de la demande** (*demand-side management*, voir Dziegielewski, 2003) sont alors apparues comme la solution aux problèmes croissants de pénuries d'eau. Elles relèvent d'un nouveau paradigme qui est qualifié de "*post-modern*" ou de nouveau paradigme hydraulique (*new hydraulic paradigm*) (Savenije & Zaag, 2002) dont l'un des enjeux clef est l'augmentation de l'efficacité d'utilisation de l'eau. En France, dès les années 1990, la mise en œuvre de ce mode de gestion a conduit les politiques de l'eau à aller dans le sens d'une régulation des modes d'occupation et d'utilisation des sols déterminants les flux d'eau dans l'hydrosystème (ex. protection des zones de captage, des zones humides, aménagement de zones d'expansion des crues). Ce mode d'action publique, qualifié de « gestion spatiale de l'eau » par Nancy et Mermet (2003), pose d'importants problèmes de communication, coordination des visions, décisions et actions des organisations en charge de la gestion de l'eau et de la gestion des espaces.

En parallèle, dans la continuité de ces débats, s'est imposée une volonté de mettre en place des processus décisionnels participatifs et collaboratifs localisés en faveur de la gestion des ressources naturelles, en France d'abord, puis de manière généralisée en Europe (Allain, 2012). Cette tendance s'inscrit dans une vision plus large de l'action publique qui tend à associer les parties concernées à l'élaboration des décisions les affectant. En matière de gestion de l'eau, ce type d'action publique est incarné par les démarches concertées de bassins (*collaborative watershed partnerships*). Un rapport récent de l'EEA (2012), intitulé « *territorial cohesion and water management in Europe, the spatial perspective* » met en lumière les deux grands enjeux de la gouvernance de l'eau : l'importance des modes d'occupation du sol qui déterminent les flux d'eau dans les hydrosystèmes, et la nécessité de rapprocher les centres de décision et d'action des territoires à enjeux.

Partie I

Présentation du projet de thèse

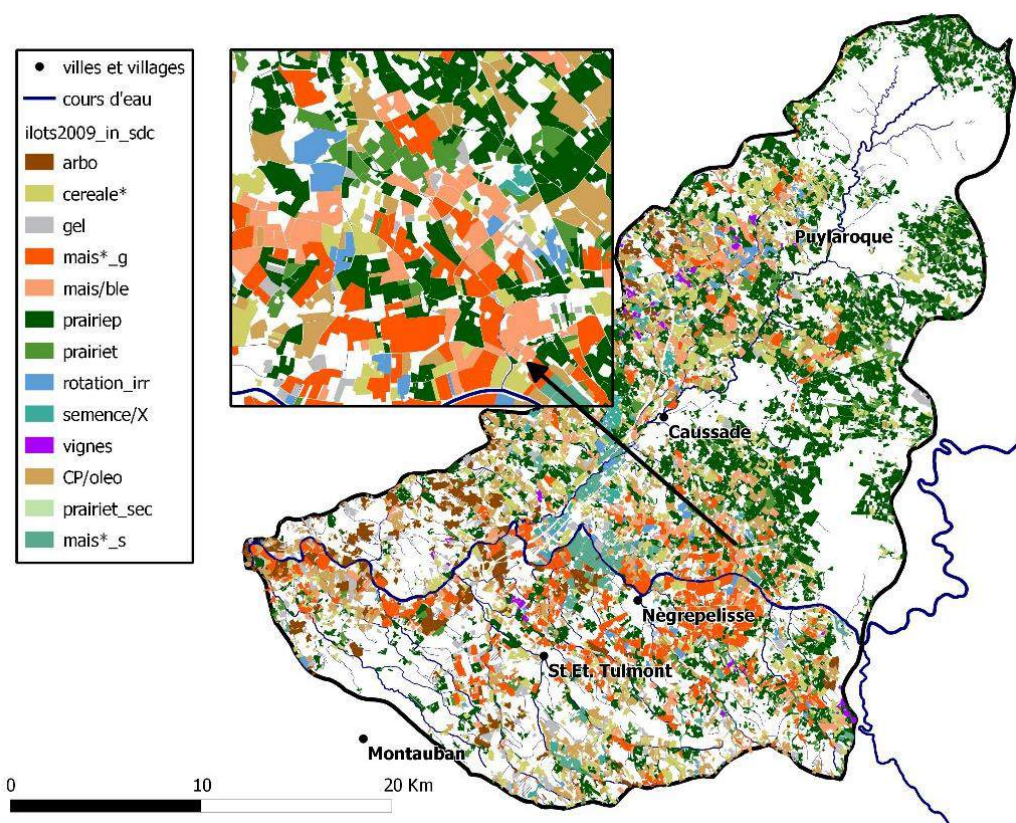


Figure 1 : Représentation cartographique de la distribution spatiale des pratiques de rotation des cultures à l'aval de l'Aveyron, issue de l'hybridation de l'information du RPG et des connaissances expertes locales.

Le pourquoi du projet de thèse

Dans cette section, je souhaite mettre en avant les éléments de contexte qui sous-tendent les objectifs et les choix méthodologiques faits pour mon projet de thèse. Nous verrons que mon travail a été orienté par la nature spatialement et temporellement distribuée des problèmes de gestion quantitative de l'eau, mais aussi par le contexte politique et social difficile dans lequel ils se se développent.

1 La gestion quantitative de l'eau en France

1.1 Cadre légal et réglementaire de la gestion quantitative de l'eau

En France, la première loi sur l'eau de 1964, relative au régime et à la répartition des eaux et à la lutte contre la pollution (article L.211 du Code de l'environnement), a instauré une gestion par bassin hydrographique. En 1992, la révision de la loi sur l'eau (article L.210-1 et suivants du Code de l'environnement) consacre l'eau en tant que « patrimoine commun de la Nation » et institue un nouveau système de planification et de gestion décentralisée et concertée à travers les Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) et les SAGE (Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux). Les zones de répartition des eaux (ZRE), où est constatée une insuffisance autre qu'exceptionnelle des ressources par rapport aux besoins en eau, sont définies peu de temps après par le décret du 29 avril 1994) pour faciliter la conciliation des intérêts des différents utilisateurs de l'eau.

D'un point de vue quantitatif, les SDAGE fixent les Débits d'Objectifs d'Étiage (DOE) et les Débits de Crise (DCR) aux points nodaux clefs du réseau hydrologique. Le DOE est un débit de référence qui permet d'assurer la coexistence normale de tous les usages, le bon fonctionnement du milieu aquatique et le bon état des eaux. Le DCR est le débit de référence en dessous duquel seules les exigences de la santé, de la salubrité publique, de la sécurité civile et de l'alimentation en eau potable et les besoins des milieux naturels peuvent être satisfaites (Comité de bassin Adour-Garonne, 2009).

Les pouvoirs publics, représentés par les Directions Départementales des Territoires (DDT), sont en charge de faire respecter ces débits. Pour cela, ils mettent en œuvre un système de gestion des prélèvements agricoles qualifié de « **système mandataire** ». Les irrigants font remonter leur demande de prélèvement via des organismes mandataires¹. Ces demandes sont examinées par le préfet qui autorise ensuite un volume total et un débit maximum par point de prélèvement.

Cette procédure annuelle est complétée par une gestion conjoncturelle de l'étiage qui se base sur l'observation du débit des cours d'eau aux points, au cours de l'été. Lorsque le débit journalier moyen mesuré dépasse les seuils instaurés² pendant trois jours consécutifs, les services de l'Etat mettent en œuvre des restrictions réglementaires de prélèvement ou des lâchers d'eau depuis les barrages situés en amont des bassins versants. Cette gestion conjoncturelle est souvent appelée « gestion par les débits », et réalisée à l'échelle hebdomadaire voir quotidienne lorsque l'étiage est sévère. Elle résulte d'une négociation multi-acteurs hebdomadaire sous la responsabilité des DDT, qui prend en compte l'état des ressources mobilisables et les besoins des irrigants à court terme.

¹ Les mandataires sont la plupart du temps des représentants des agriculteurs (Chambre d'agriculture) ou des gestionnaires de barrages allouant parfois eux-même, dans le cadre d'une relation commerciale, des droits de prélèvement aux agriculteurs.

² Les seuils instaurés sont définis par les SDAGE pour chaque point nodal, typiquement Le DOE, le débit d'alerte (80% du DOE) et le débit de crise (50% du DOE). Pour des précisions sur la gestion conjoncturelle des étiages sur l'Aveyron, voir Gehlé (2012).

Pour les bassins en déséquilibre, les SDAGE introduisent des Plan de gestion des étiages (PGE), formalisés dans un document contractuel³. Ces PGE définissent les règles de partage de l'eau entre usages et milieux pour la période d'étiage. Ils limitent les autorisations de prélèvement de manière à respecter les DOE 8 années sur 10. Dans le SDAGE du bassin Adour-Garonne, tous les sous-bassins présentant un déséquilibre devraient disposer d'un PGE. Cependant, l'absence d'institution volontaire pour porter le PGE ou l'incapacité des acteurs à établir un document consensuel fait que certains bassins n'en disposent pas. C'est notamment le cas du PGE de la rivière Aveyron.

1.2 Les effets pervers du système mandataire

La récurrence du non-respect des débits d'objectif d'étiage dans certains sous-bassins met régulièrement en lumière la déconnection entre autorisations de prélèvements allouées par la DDT et ressource en eau dans ces bassins. Cette déconnection est le résultat de stratégies d'acteurs dans le système mandataire (Debril & Therond, 2013).

Les organismes mandataires perçoivent les DDT comme un acteur cherchant à réduire les prélèvements puisqu'ils ont la responsabilité de faire respecter les DOE. Craignant une perte définitive des volumes non demandés une année, ils maintiennent une certaine opacité autour de la réalité des besoins agricoles et poussent les agriculteurs à reconduire leurs demandes d'une année sur l'autre. Par ailleurs, certains agriculteurs ont tendance à demander des débits de prélèvement dont ils n'ont pas besoin en situation normale mais qui leur permettent de limiter l'impact potentiel de restrictions. Ainsi, lors de restrictions partielles (ex. deux jours par semaine), ils peuvent accélérer leur tour d'eau en mobilisant un débit plus fort et couvrir la totalité de leurs parcelles (Debril & Therond, 2013).

La DDT, pourtant consciente de ces biais, ne dispose pas des moyens permettant d'apprécier le niveau et la cohérence des demandes de prélèvement puisque les mandataires ne lui fournissent que rarement l'information sur les surfaces et les cultures réellement irriguées. Au final, les DDT ne restreignent pas vraiment les demandes de prélèvement. La procédure mandataire permet surtout d'enregistrer les demandes pour être en mesure de réaliser des contrôles pendant les périodes d'irrigation et de restrictions de prélèvement.

1.3 La Loi sur l'eau et les Milieux Aquatiques

Au niveau européen, la Directive Cadre sur l'Eau (DCE, 2000/60/CE), adoptée le 23 octobre 2000, établit un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau et préconise de travailler à l'échelle de « districts hydrographiques ». Au total, 14 districts hydrographiques, dont 9 en métropole, sont ainsi établis en France. Ces derniers sont répartis au sein des 6 bassins métropolitains gérés par les agences de l'eau. Pour prendre notamment en compte les exigences de la DCE, la France a adopté une troisième loi sur l'eau et les milieux aquatiques (dite « LEMA », Loi n°2006-1772 du 30 décembre 2006, décret d'application du 24 septembre 2007 et circulaires du MEDDTL du 30 juin 2008 et 3 août 2010).

Prenant acte du grand nombre de bassins hydrographiques qui présentent des déficits chroniques malgré les dispositifs législatifs et réglementaires en place, la LEMA a comme objectif une « gestion équilibrée et durable de la ressource en eau qui prenne en compte les adaptations au changement climatique ». Elle sacralise, d'une part, le principe de la gestion de l'eau par bassin versant et, d'autre part, l'idée de renforcer la gestion locale et concertée des ressources en eau. Dans son volet traitant de la gestion quantitative, elle prévoit de nouvelles modalités de réglementation des autorisations de prélèvements agricoles qui doivent être appliquées en priorité au sein des ZRE. Elle instaure la définition de volumes prélevables (Vp) pour l'agriculture, par unité hydrologique élémentaire (sous-bassin versant), compatibles avec la ressource réellement disponible pour cet usage. Ces Vp

³ Contrat liant l'État, l'institution qui porte le PGE, les représentants des usagers, l'agence de de bassin

doivent permettre de satisfaire les DOE huit années sur dix et donc de ne plus gérer la crise que lors d'épisodes climatiques exceptionnels, comme cela avait été défini dès la loi sur l'eau de 1992. Ce Vp est attribué et géré par une nouvelle personne morale publique ou privée appelée « Organisme Unique De Gestion Collective » (OUGC). Ce dernier, désigné par le préfet sur dossier de candidature, a pour mission de représenter les irrigants (MEEDDTL, 2009).

Dans la procédure d'application de la « réforme des volumes prélevables », clarifiée dans la circulaire de juin 2008, il était prévu que des volumes prélevables initiaux (V_i) soient estimés qui feraient ensuite l'objet d'une phase de négociation et d'adaptation avec la profession agricole. Cette négociation-adaptation pouvait porter sur plusieurs points : (i) la prise en compte de spécificités locales ou d'erreurs de calcul, (ii) la prise en compte des incertitudes sur le calcul des Vp par l'attribution d'un volume supplémentaire pouvant aller jusqu'à 20% du V_i , plafonné au volume prélevé dans le passé en année quinquennale sèche⁴, (iii) la possibilité de mettre en œuvre une méthode alternative de gestion par les débits sur les petits bassins versant équipés d'un système de mesure des débits (iv) l'intégration de volumes additionnels estimables au printemps grâce à un outillage dédié (ex. des modèles) et (v) l'intégration des volumes des projets réalistes de création de retenues, si leur mise en eau est prévue avant le 31 décembre 2014. Dans la section suivante, je discute des difficultés liées à la mise en œuvre de cette réforme dans le bassin Adour-Garonne.

2 Le bassin Adour-Garonne: des déficits qui persistent

2.1 Un bassin en déséquilibre structurel

Le bassin Adour-Garonne (BAG) est très représentatif des problèmes de gestion quantitative de l'eau (GQE) en France et en Europe. Il illustre notamment les difficultés liées à la mise en œuvre de la DCE et sa déclinaison française, la LEMA. La majorité du territoire du bassin Adour-Garonne est classée en zone de répartition des eaux (ZRE, voir Figure 2 et section 1.1). Cela peut s'expliquer par la conjonction d'un déficit pluviométrique estival marqué, d'une forte pression de l'irrigation⁵ et de réserves stockées insuffisantes en années sèches ou dont le positionnement spatial n'est pas adapté (au regard de l'intensité et de la distribution des prélèvements d'irrigation). On observe par conséquent des conflits d'usages centrés sur l'irrigation. Malgré les moyens (stocks d'eau) et les dispositifs de gestion mis en œuvre présentés ci-avant (SDAGE, SAGE, PGE, Arrêtés départementaux et interdépartementaux, cellules de gestion des étiages et de crise), les débits mesurés sont régulièrement inférieurs au DOE voire au DCR dans de nombreux sous-bassins. Le déficit structurel du BAG, défini comme la demande en eau qu'il est impossible de satisfaire 2 années sur 10 avec la ressource disponible, est estimé à 250 million m³ (SDAGE 2010).

⁴ Une année quinquennale sèche est définie par un niveau d'hydrologie naturelle bas ayant la probabilité d'être atteint une année sur cinq. On utilise le plus souvent un indicateur de débit moyen minimal annuel glissé sur 10 jours (dit « VCN10 »). Voir Lang Delus (2011)

⁵ Selon l'Agence de l'Eau Adour Garonne (AEAG) en 2009, l'irrigation est responsable de 70% des prélèvements en eau du bassin en période d'étiage.

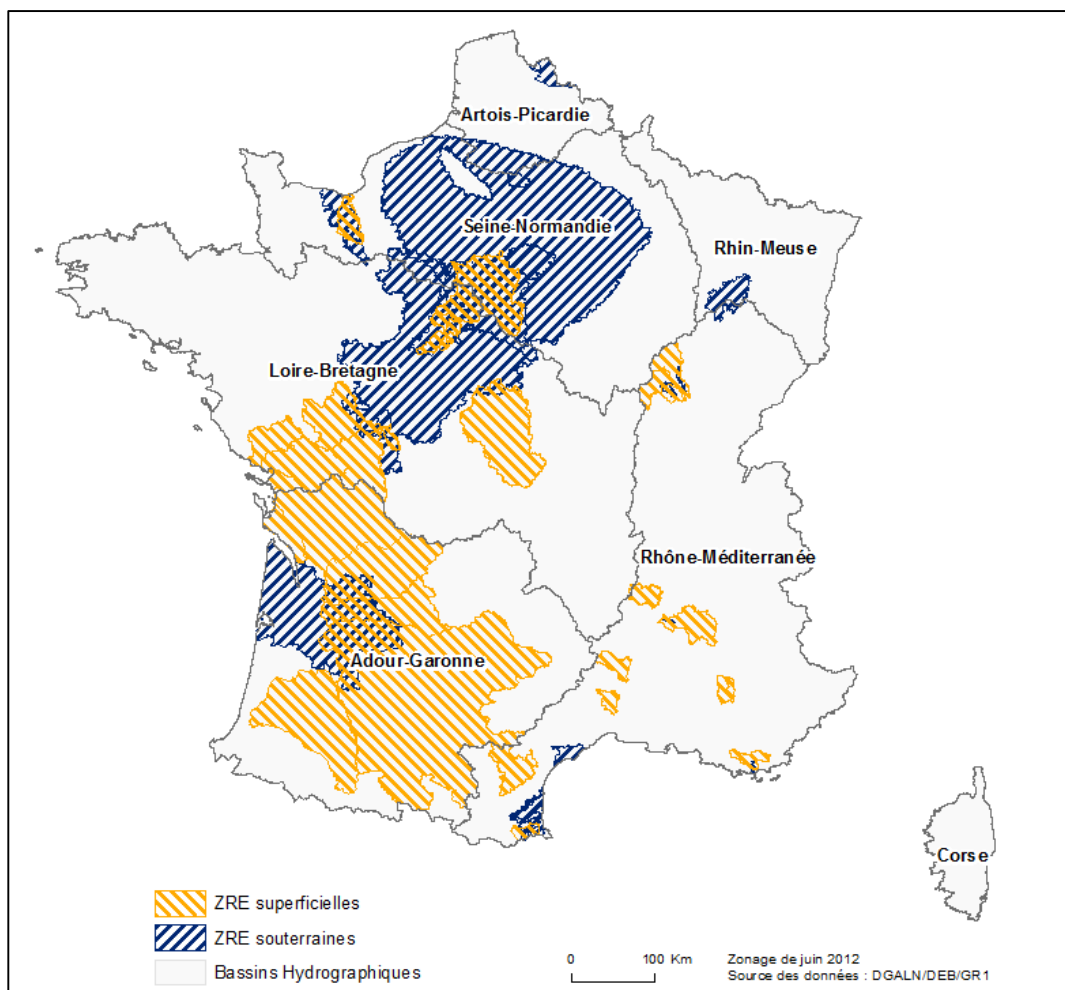


Figure 2 : Zones de Répartition des Eaux des Eaux Superficielles et Souterraines – Juin 2012. © UMR AGIR/ONEMA (Balestrat & Therond, 2014)

2.2 Une profession agricole qui défend l'irrigation et revendique une gestion de l'offre

En France, c'est dans le BAG que la pratique de l'irrigation est la plus développée. Approximativement 550 000 ha sont irrigués (soit environ 40% des surfaces irrigués de France), répartis au sein de 30 000 exploitations. Sur le bassin, les surfaces irriguées ont très fortement augmentées entre les années 1960 et la fin des années 1990, puis elles se sont stabilisées sur la fin des années 1990 avant de diminuer entre 2000 et 2007. Depuis, il semble qu'elles soient relativement stables (Figure 3).

Pour les exploitations agricoles du BAG, l'irrigation permet à la fois d'augmenter le nombre d'espèces cultivables (ex. soja) et de cultiver le maïs sur des zones pédologiques souvent considérées comme inadaptées aux céréales d'hiver ou cultures de printemps en sec : les *boulbènes* (Brun, 2003). Le maïs présente une très forte productivité potentielle et l'une des plus fortes marges brutes par hectare irrigué (Levy et al., 2005). Il est aujourd'hui cultivé sur environ 2/3 des surfaces irriguées du BAG (50% de maïs grain et 10% de maïs fourrage). L'irrigation du maïs permet une augmentation d'environ 30 quintaux par ha (différence des moyennes des rendements du maïs grain irrigué et non irrigué départementaux, Teyssier, 2006). Lorsqu'il est irrigué, le maïs est le plus souvent cultivé en monoculture. Entre le milieu des années 1990 et la fin des années 2000, les surfaces en maïs ont baissé d'environ 20 % dans le BAG. Cette diminution est liée à de multiple facteurs socio-économiques comme la diminution des surfaces agricoles (liée notamment à l'urbanisation) ou encore les contre-effets des sécheresses des années 2003 à 2005. Cette diminution de surfaces en maïs irrigué s'est accompagnée d'une augmentation des surfaces de blé dur et tendre et des surfaces en prairies (Danel, 2011).

Les représentants agricoles des syndicats majoritaires estiment que les dispositifs législatifs et réglementaires qui conduisent à des restrictions récurrentes des prélèvements d'irrigation mettent en danger la viabilité des exploitations et des filières agricoles en place (Pagnol, 2013). La profession agricole porte un discours clair : il faut adapter l'offre et les modalités de gestion aux besoins du secteur agricole. Elle envisage deux leviers d'actions : la révision des DOE et la construction d'ouvrages de stockage de l'eau. Il est en effet communément accepté que les DOE sont un construit social et scientifique dont l'objectivation est problématique (Fernandez & Trottier, 2012). Pour ce qui est de la construction de nouvelles retenues, malgré une volonté financière de l'Etat⁶, il n'existe que très peu de sites adaptés non encore aménagés. De plus, devant les difficultés procédurales et de rentabilisation les maîtres d'ouvrage sont souvent difficiles à trouver (Debril & Therond, 2013)

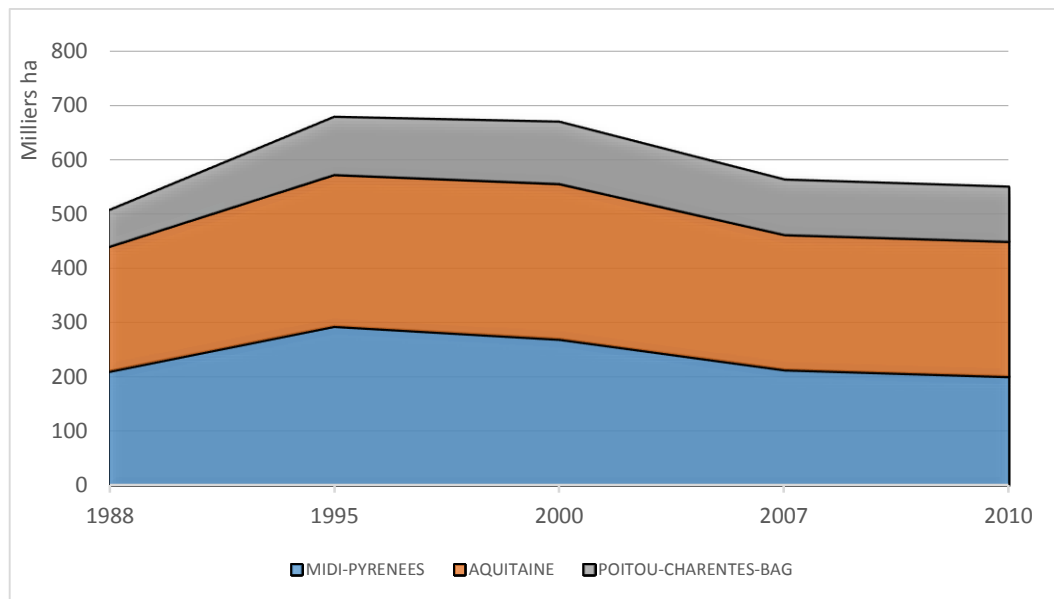


Figure 3 : évolution des surfaces irriguées au sein du bassin Adour Garonne (BAG), des régions Midi-Pyrénées (bleu), Aquitaine (orange) et de la part de la région Poitou Charente incluse dans le BAG (gris) entre 1988 et 2010 en millier d'hectare (Source IFEN 2012 et AGRESTE 2012)

2.3 La LEMA : une révolution avortée de la gestion de l'eau dans le BAG

C'est dans ce contexte que l'AEAG et la DREAL Midi-Pyrénées⁷ ont initié, dès 2009, l'application de la législation sur les Vp dans le BAG. Les Vi ont été estimés pour chaque bassin élémentaire sur la base des travaux antérieurs (ex. réalisés pour les PGE) et de résultats d'études dédiées. Leurs estimations se base sur le volume d'eau au-dessus du DOE pendant la période d'étiage en année quinquennale sèche, une fois retranchés les besoins pour l'eau potable et industriels (Amen & Lhuissier, 2012). Dans de nombreuses situations, les volumes proposés étaient largement inférieurs aux volumes historiquement prélevés, eux-mêmes déjà bien inférieurs aux volumes historiquement autorisés (Figure 4a).

⁶ Voir le Plan d'adaptation de la gestion de l'eau (MEEDDTL - Ministère de l'Ecologie, de l'Energie & MAAPRAT, 2011) et le Plan national d'adaptation aux effets du changement climatique (MEEDDTL, 2011)

⁷ La DREAL Midi Pyrénées est la DREAL **coordonnatrice** de bassin pour le BAG

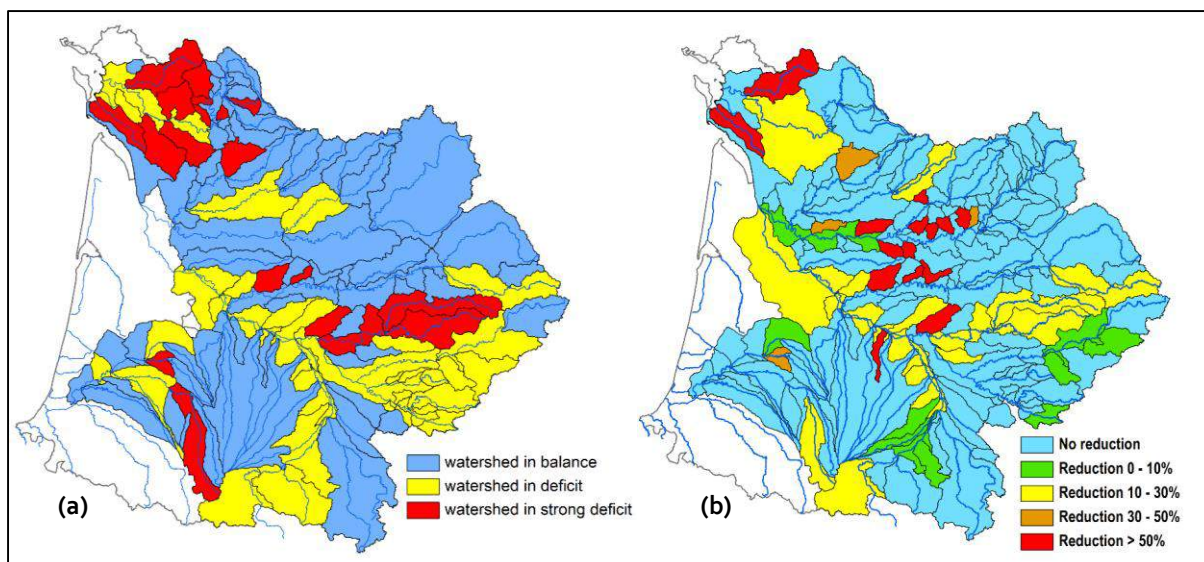


Figure 4 : (a) écart entre volumes prélevables initiaux et volumes prélevés pour l'irrigation en année hydrologique quinquennale sèche et (b) Niveau de réduction des volumes prélevables définitifs par rapport aux volumes historiquement autorisés (source DREAL Midi-Pyrénées).

Outre la nature résolument pro-environnementale de la LEMA qui ne tient pas compte des impacts et des contraintes socio-économiques qui pèsent sur les exploitations, les représentants du monde agricole, ont rapidement rejeté la logique même de gestion par des volumes annuels définis sur la base d'année hydrologique quinquennale sèche. Leur argument principal est que ce mode de gestion revient, statistiquement 4 années sur 5, à laisser couler de l'eau qui aurait pu être utilisée sans même remettre en cause le respect des DOE. En toute logique, la profession agricole considère que seul un mode de gestion basé sur les débits au fil de la campagne d'irrigation est acceptable.

La concertation pour la négociation des Vp s'est engagée en 2009. En revanche, elle a rapidement abouti à une rupture explicite des négociations. La profession agricole a considéré inacceptable toute discussion basée sur une gestion par les volumes. Cette rupture des négociations a duré jusqu'à 2011 puis, sous l'effet du lobbysme agricole et suite à l'intervention répétée du président de la république de l'époque, de nombreux assouplissements et dérogations ont été apportés à la réforme. Ces adaptations de la LEMA, spécifiques au bassin Adour-Garonne, ont été formalisées sous la forme d'un protocole d'accord entre l'Etat et les chambres régionales d'agriculture d'Aquitaine et de Midi-Pyrénées.

Ce protocole d'accord permet la mise en œuvre de la réforme originale sur les bassins où les Vp finaux sont inférieurs aux volumes prélevés maximum, c'est à dire dans les bassins où la demande est inférieure à la ressource. En revanche, inversement aux objectifs initiaux de la réforme, il définit que pour les bassins en déficit structurel le Vp sera fixé au niveau du maximum de volume prélevé jusqu'en 2021 (le plus souvent le volume de prélèvement observé en 2003). On voit dans la Figure 4b que la plupart des bassins en déficit ne connaissent qu'une réduction faible, voire nulle. Par cette décision qui ne remet pas en cause le niveau de pression des usages sur la ressource, le protocole d'accord instaure donc implicitement la continuité de la gestion par les débits. En revanche dans ces bassins, les OUGC devront mettre en œuvre un « protocole de gestion » qui permettra de réduire le risque de passage sous les DOE. La nature exacte de ces protocoles de gestion n'est pas spécifiée, et reste donc du ressort des OUGC. Par ailleurs, l'accord spécifie un jeu de mesures organisationnelles et financières qui doivent permettre de favoriser l'aboutissement de projets de création de ressources (retenues).

3 Quelle gestion quantitative de l'eau en Adour-Garonne?

3.1 Des injonctions sociétales conduisant vers une gestion spatiale de l'eau

En parallèle des dérogations accordées à la réforme de volumes prélevables, outre la création de nouvelles retenues, le plan d'adaptation de la gestion de l'eau du ministère de l'environnement (MEEDDTL & MAAPRAT, 2011) appelle à conduire une stratégie prospective pour la gestion de la demande en eau. Il recommande notamment de « travailler à des changements de pratiques agricoles [...] et [...] d'assolement » en adéquation avec les ressources disponibles. Dans la même lignée et encore plus explicitement, le Plan National d'Adaptation aux effets du Changement Climatique (MEEDDTL, 2011) demande aux chercheurs d' « accompagner le développement [...] d'une occupation des sols compatible avec les ressources en eau disponibles localement ». La tendance actuelle, que ce soit dans une logique de création de ressource ou de stabilisation des volumes disponibles pour l'irrigation, s'inscrit dans l'idée d'une planification territoriale par la « gestion spatiale de l'eau ». Il s'agit de développer des démarches prospectives afin d'évaluer les possibilités d'influer sur la demande par la répartition des systèmes de culture dans l'espace (choix de types de cultures et pratiques culturales, distribution spatiale, proportions dans les assolements) pour atteindre des objectifs de gestion quantitative de l'eau.

3.2 Le rôle croissant de la profession agricole

C'est certainement son approche trop générique et centralisée qui a valu à la réforme des Vp d'échouer. En effet, elle s'est imposée à l'ensemble du territoire national. La concertation territoriale envisagée à un niveau local s'est ainsi limitée à une renégociation à la marge des projets du Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable. A ce sujet, le « rapport Martin », issu d'une mission parlementaire récente (Martin, 2013) concernant l'application de la réforme des Vp, stipule :

« Il nous est apparu qu'on ne saurait se satisfaire d'une réponse uniforme aux questions posées tant les situations sont marquées par la diversité » - Extrait du Rapport Martin, 2013

Le rapport conclut ensuite sur le besoin de mettre en œuvre une gouvernance de l'eau qui laisse place à la gestion décentralisée et concertée de la ressource.

Je défends cependant l'idée que la réforme des Vp, malgré les dérogations obtenues par la profession agricole qui ont conduit à un alignement des Vp sur les volumes maximums prélevés, reste une opportunité pour que se développe une gouvernance territorialisée de l'eau. En effet cette réforme a aussi induit, dans une certaine mesure, le transfert de la responsabilité du respect des DOE à l'OUGC, qui, pour une grande majorité, sont des Chambres d'Agriculture. Les DOE n'étant pas remis en question dans le protocole d'accord, les OUGC, au travers de la mise en œuvre des « protocoles de gestion », devront trouver des solutions pour limiter l'occurrence des crises de gestion quantitative de l'eau (le passage des débits sous les DOE) et garantir au mieux la satisfaction des usages agricoles. Ces organisations ne réussiront que si elles sont capables de réduire l'incertitude sur le niveau des besoins agricoles en eau, au fil de la saison, afin de planifier au mieux des lâchers pour le soutien des étiages. Leur enjeu consistera à développer un système d'information partagé entre les agriculteurs irrigants et les gestionnaires qui permette aux deux parties d'avoir une meilleure visibilité sur l'état des ressources et une meilleure estimation spatiale et temporelle des besoins. Pour atteindre cet objectif, les OUGC vont devoir développer une meilleure connaissance des territoires irrigués.

3.3 Des spécificités spatiales et temporelles à prendre en compte

Les problèmes de gestion quantitative de l'eau s'expriment au sein de bassins particuliers et, le plus souvent, sont très localisés au sein même de ceux-ci. Si le déséquilibre annuel des bassins versants permet de synthétiser l'ampleur d'un problème, il ne révèle en aucun cas les spécificités spatiales et temporelles dont il découle. Dans les faits, les déséquilibres sont le résultat des interactions entre la dynamique naturelle des ressources en eau, des prélèvements et des modes de gestion des ressources, ceci à l'échelle journalière voire horaire.

Chaque sous-bassin présente des spécificités biophysiques (ex. hydrographie, pédologie, microclimats) et institutionnelles (ex. présence d'un gestionnaire de barrage privé). Son fonctionnement hydrologique est instruit par des actions de gestion qui s'opèrent à différents niveaux d'organisation : l'exploitation agricole, l'Association Syndicale Autorisée⁸, le bassin de production, la zone de restriction d'usages, le bassin d'influence d'un barrage.

De plus, le déséquilibre estimé à l'échelle annuelle d'un bassin ne révèle en rien la dynamique temporelle avec laquelle il s'exprime. Certaines unités de gestion présentent, par exemple, des étiages sévères et prolongés à l'automne (c'est le cas de l'Aveyron Aval), tandis que d'autres, aux contraire, présentent des étiages peu sévères mais répartis sur toute la durée de l'été. Le déficit s'exprime aussi avec de grandes disparités temporelles et d'intensité pour chaque bassin, conditionnées par la variabilité climatique interannuelle et saisonnière qui joue sur les besoins d'irrigation et l'état de remplissage des barrages prévus pour le soutien d'étiage.

Enfin, la mesure journalière de l'intensité de l'étiage aux points nodaux hydrologiques n'informe pas non plus sur l'origine des problèmes. Les situations de prélèvements problématiques sont le plus souvent localisées dans l'espace. Elles résultent de situations d'interaction spécifiques entre des systèmes de culture (ex. choix de variété, objectifs de production, stratégies de semis et d'irrigation), l'état hydrique des sols, l'hydrologie des ressources en eau, la disponibilité des ressources de soutien d'étiage, des tendances météorologiques et des normes de restrictions ou de soutien d'étiage en rigueur. Seulement certaines situations de prélèvement sont à l'origine des déséquilibres mesurés annuellement à l'échelle du bassin concerné par le déficit. Afin d'identifier, de caractériser et de gérer les causes des déficits dans les bassins versants, il faut être capable d'analyser finement les caractéristiques des paysages agricoles qui déterminent la demande agricole et ses modalités d'interaction avec les ressources en eau.

4 Enjeux pour la thèse

Au regard du contexte décrit ci-dessus, je constate donc que la gestion quantitative de l'eau dans le BAG fait face à un enjeu majeur de construction de connaissances aux échelles de gestion opérationnelles, qui soient partagées entre des acteurs aux objectifs divergents. Ce besoin en connaissances est de deux ordres :

- > La production de connaissances fines et transparentes sur les situations de prélèvement dans les territoires irrigués (systèmes d'information) qui permettent d'anticiper les dynamiques intra et inter annuelle de demande agricole au sein de ces espaces.
- > La production de connaissances sur les modalités d'occupation et de gestion des sols agricoles envisageables (ci-après appelées alternatives), qui permettraient une meilleure adéquation entre la dynamique de demande d'irrigation et la dynamique de disponibilité des ressources.

⁸ L'Association Syndicale Autorisée (ASA) est le statut le plus commun des associations d'irrigants. Elle regroupe les propriétaires ou les fermiers des terrains aménagés pour l'irrigation et le drainage.

Ces connaissances pourraient permettre d'établir des stratégies de gestion de la demande qui prennent en compte la variabilité spatiale et temporelle de la demande induite par la conduite des cultures et par la gestion conjoncturelle des ressources en eau (lâchers de barrages et restrictions d'usage). J'insiste à nouveau ici sur le fait que ces deux modes de gestion, de l'espace et de l'eau, sont interdépendants et que, par conséquent, réfléchir sur la demande nécessite de prendre en compte les modalités de gestion conjoncturelle de l'étiage.

Des systèmes d'information sur les territoires de gestion, qui rendent compte des dynamiques spatio-temporelles, seront donc des outils clefs. Ils pourront servir non seulement pour la gestion opérationnelle de l'étiage par les DDT et les OUGC, mais aussi pour faciliter l'expression et l'évaluation des stratégies de gestion quantitative de l'eau par la demande.

Afin de répondre à ces besoins, j'ai développé une méthode qui favorise le partage des informations sur les territoires irrigués. Mon approche s'attache à encourager l'expression des visions des acteurs locaux sur les possibles adaptations de l'utilisation du sol qui permettraient, considérant les modalités de régulation en place, de réduire les crises de gestion quantitative de l'eau. Ma méthode est basée sur le développement et l'utilisation de systèmes d'information géographique et d'outils de modélisation de processus spatialisés. Cette démarche ainsi que les cadres scientifiques mobilisés sont présentés dans le chapitre suivant.

Le projet de thèse

Dans cette section, je présente le projet de doctorat que j'ai mené pour **répondre aux besoins de la gestion quantitative de l'eau sur le BAG** détaillés dans la section précédente : des connaissances partagées pour la mise en adéquation des dynamiques de demande avec l'offre disponible et les modalités de gestion conjoncturelle en place. Je définis d'abord mes objectifs, appliqués et scientifiques, puis je présente les cadres conceptuels et méthodologiques mobilisés. Je termine en présentant la démarche générale mise en œuvre pour la conception-évaluation d'alternatives de distribution spatiales des systèmes de culture sur le territoire irrigué à l'aval de l'Aveyron.

1 Objectifs, questionnements et hypothèses

1.1 Objectif appliqué

L'objectif appliqué de mes travaux était **de développer et tester une méthodologie⁹ transposable pour la conception et l'évaluation de modalités d'interaction entre activités agricoles et gestion des ressources en eau permettant une gestion durable des étiages à l'échelle des territoires de gestion de ceux-ci** (quelles alternatives d'usage des sols pour mieux gérer l'étiage ?). J'ai cherché à **éliciter¹⁰ et évaluer les visions** des acteurs locaux sur **des modes d'occupation et d'utilisation des sols qui répondent aux enjeux de gestion quantitative de l'eau spécifiques à un territoire** en déficit. Cette méthode n'a pas vocation à développer des outils d'aide à la décision pour la gestion opérationnelle de l'eau en cours d'étiage (quelles informations pour savoir combien lâcher d'eau maintenant ?)¹¹.

J'ai choisi d'utiliser le **concept de système de culture**, défini comme « *l'ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles cultivées de manière identique* » (Sebillote, 1990) pour la description de l'occupation et de l'utilisation des sols agricoles à des fins de gestion spatiale de l'eau. En effet, il permet de décrire, entre autres, les facteurs clefs de la dynamique de demande en eau agricole : les pratiques de succession culturales et d'opérations techniques au champ pour une ou des situations pédoclimatiques données.

Dans les zones en déséquilibre du BAG, dominées par des systèmes de production irrigués, se préoccuper de l'usage des sols agricoles dans une logique de gestion spatiale de l'eau nécessite de réfléchir à la distribution spatiale de systèmes de cultures. J'ai donc formulé l'objectif appliqué de mon doctorat ainsi :

- > **Quelles distributions spatiales des systèmes de culture dans les territoires irrigués pour limiter l'occurrence des crises de gestion quantitative de l'eau ?**

⁹ Un ensemble de méthodes articulées au sein d'une procédure structurée afin d'atteindre un objectif donné.

¹⁰ Terme commun dans le champ lexical de l'ingénierie des connaissances (*Knowledge Engineering*, voir Studer et al., 1998) : le procédé qui permet de guider les gens à spécifier et si possible à quantifier voir dans notre cas à spatialiser les variables descriptives qu'ils mobilisent pour décrire un phénomène.

¹¹ Cette question est traitée par l'UMR AGIR en parallèle de mon doctorat via le projet GEDEAU financé par l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques

1.2 Questions de recherche

Afin de répondre à cette question via ma démarche de conception-évaluation, j'ai identifié trois enjeux scientifiques principaux, d'ordre méthodologique. J'ai d'abord cherché à proposer **une méthode qui permette de représenter les situations de prélèvement dans le territoire irrigué dans le but d'appréhender leurs liens avec les crises de gestion quantitative de l'eau** (franchissement des DOE). Un premier objectif scientifique visait donc à répondre à la question :

Comment représenter les interactions entre distribution spatiale des SdC et gestion opérationnelle de l'eau dans un territoire irrigué, aux échelles temporelles de décision et d'action des acteurs ?

Cette question a été déclinée en trois sous-questions:

- > Comment représenter la distribution spatiale de systèmes de culture dans le paysage agricole en vue de son évaluation pour la gestion quantitative de l'eau ?
- > Comment représenter la gestion conjoncturelle des étiages pour évaluer le potentiel d'alternatives de distributions spatiales des SdC à limiter les crises de gestion quantitative de l'eau ?
- > Comment représenter les interactions entre distribution spatiale des systèmes de culture et crises de gestion quantitative de l'eau ?

J'ai également cherché à **imaginer et développer une méthode qui permette aux acteurs de concevoir et évaluer des alternatives de distributions spatiales de systèmes de culture à des échelles qui ne correspondent pas toujours à leurs niveaux d'analyse et d'action**. Un deuxième objectif méthodologique visait donc à répondre à la question :

Comment permettre aux acteurs d'exprimer leur visions à l'échelle du territoire, et au collectif acteur-scientifique de les évaluer ?

J'ai décliné cette question en deux sous-questions plus précises :

- > Quels outils et méthodes pour co-concevoir des territoires agricoles qui répondent à un objectif de gestion quantitative de l'eau ?
- > Comment associer participation et simulation pour formaliser, évaluer et analyser les visions de divers acteurs sur un territoire agricole?

Enfin, un dernier enjeu était le caractère transposable des méthodes et outils développés pour traiter une problématique qui s'exprime, comme présenté ci-dessus, de manière très spécifique au sein des territoires.

En résumé, **mon objectif scientifique était de développer et tester une méthodologie qui permette de représenter le territoire irrigué de manière fine, de concevoir et évaluer des modifications dans les systèmes de culture et leur distribution spatiale vis-à-vis de leur impact sur les étiages**. Cette méthodologie est appelée ci-après « **démarche de conception-évaluation** ».

2 Hypothèses de travail et choix pour le dispositif participatif

L'hypothèse principale que j'ai faite pour approcher les questionnements ci-dessus, s'appuie sur les travaux de L. Clavel (2010) et J. B. Narcy (2004) :

H1 La répartition spatiale des SdC permet de résoudre des problèmes de gestion quantitative de l'eau

De plus, sur la base des travaux de N. Becu (2006) et C. Barnaud (2008) qui portent sur les représentations mentales des acteurs, je fais également les hypothèses suivantes :

H2 Les acteurs du territoire ont une opinion sur les modifications à apporter à leur territoire pour résoudre les problèmes de gestion quantitative de l'eau.

H3 La vision des acteurs est déterminée par leurs enjeux et leur représentation du fonctionnement du système actuel. Ces enjeux déterminent l'espace des changements envisagés comme acceptables et réalistes par les acteurs ;

Il faut noter que mon projet a pris place dans un **contexte tendu sur la question de la gestion quantitative de l'eau**. Les phrases suivantes ont été relevées récemment et illustrent bien la polarisation du débat entre « pour » et « contre » le soutien à l'agriculture irriguée.

- > « Faucheurs de science, occupants de Notre Dame des Landes, opposants au barrage de Sirvens,... les mêmes méthodes, les mêmes paumés de la décroissance. » (AGPM, 2014)
- > « Quelle différence entre la mentalité du CG81 et de l'Agence de l'eau et celle de la colonisation de l'Afrique au XVIII^{ème} siècle ? Même mentalité. L'état arrive, il dit : 'maintenant tu dégages ' »(Collectif Tant qu'il y aura des bouilles <http://tantquilyauradesbouilles.files.wordpress.com>)

Les services de l'Etat, responsables de l'application de la LEMA mais aussi du maintien de l'activité agricole sur les territoires ruraux, sont les arbitres de ces débats parfois violents. Malgré son intérêt appliqué et scientifique, la question posée, celle d'une réflexion autour de changements de pratiques, est opposée aux discours et aux demandes de la profession agricole et très mesurée par rapport aux opposants à la construction de barrages. Alors que les principales associations écologiques prônent des changements radicaux allant vers la fin de la culture de maïs, les principaux élus des syndicats agricoles de la région Midi-Pyrénées ont un point de vue que l'on peut qualifier de conservateur puisqu'ils refusent tout débat sur le changement des pratiques à des fins de gestion quantitative de l'eau.

D'après les travaux de Barnaud (2008), **l'explicitation préalable des enjeux des acteurs, des jeux de pouvoirs et d'influence dans les arènes locales peut permettre de construire une démarche adaptée et d'assurer l'intérêt d'une certaine diversité d'acteurs**. Je me suis donc fixé comme objectif de développer une démarche de conception-évaluation acceptable par les différentes parties prenantes de la problématique de gestion des étiages.

Deux choix méthodologiques en ont découlé. Tout d'abord, suite à la demande de plusieurs experts consultés et acteurs concernés, pour conduire les travaux de conception, j'ai constitué et animé deux groupes d'acteurs d'enjeux *a priori* en contradiction sur le sujet de la gestion quantitative de l'eau. Ensuite, afin d'assurer l'adhésion des acteurs agricoles au processus de conception-évaluation, j'ai choisi de leur permettre d'adapter notre question de recherche tout en m'assurant qu'elle n'était pas dénaturée. Cela a notamment abouti, lors des ateliers de conception avec les acteurs agricoles, à ajouter la notion de durabilité économique des exploitations. Enfin, j'ai explicité que l'orientation de nos questions de recherche était le reflet du contexte sociétal et non pas une idéologie portée par l'INRA. Je pense ainsi avoir atteint l'objectif d'une démarche acceptable: le processus participatif a été conduit sans grande difficulté. Les choix retenus ont permis d'appliquer et de tester la démarche de conception-évaluation dans de bonnes conditions.

3 La posture de recherche: cadres théoriques et positionnements

3.1 Trouver une approche adaptée aux enjeux thématiques du BAG

Au regard du contexte présenté, s'intéresser aux problèmes de gestion quantitative de l'eau nécessite:

1. d'appréhender les territoires irrigués aux échelles où s'expriment et sont gérés les problèmes de GQE,
2. sans omettre de comprendre et de représenter les problèmes tels qu'ils s'expriment localement, dans toute la complexité spatiale et temporelle des interactions entre systèmes de cultures, systèmes biophysiques et climatiques, système de gestion conjoncturelle,
3. de construire des connaissances adaptées aux besoins des acteurs et partagées par la diversité des parties prenantes.

Je présente ci-après les postures scientifiques et les cadres théoriques que j'ai mobilisés. Pour guider ces choix, j'ai adopté la posture générale des **sciences de l'intégration et de l'implémentation** (*Integration and Implementation Sciences*, Bammer, 2005), qui cherche à structurer la prise en compte de la complexité, des incertitudes et des dynamiques de changement intrinsèques aux problèmes de société, et donc à accepter le fait qu'il n'y a pas de solution optimale (« *perfect knowledge and solutions are impossible* »). Les trois piliers de cette approche sont (1) *systems thinking and complexity science*, (2) *participatory methods*, and (3) *knowledge management, exchange and implementation*. Les cadres théoriques mobilisés pour définir ma posture et ma démarche sont donc présentés via ces trois thématiques dans les trois sections suivantes.

3.2 Appréhender la complexité des territoires irrigués ?

3.2.1 La systémique comme épistémologie

Un système peut être défini simplement comme « **un ensemble qui se tient** »¹². Cette définition met en avant un aspect central des approches systèmes : celui de considérer les relations des sous-ensembles qui le composent comme les tenants d'un système. C'est la raison pour laquelle je ne me limite pas à considérer le paysage agricole pour analyser l'impact de changements dans les pratiques agricoles et leur distribution spatiales sur la demande d'irrigation. Je considère plutôt le territoire irrigué comme un ensemble « qui se tient », composé d'entités agricoles, hydrologiques et de processus gestion des ressources en eau. Ceci implique qu'un changement dans les pratiques agricoles peut induire des changements dans les autres sous-ensembles et donner lieu à des phénomènes émergents issus de ces interactions.

¹² Du verbe grecque *synhistanai*, « se tenir ensemble »

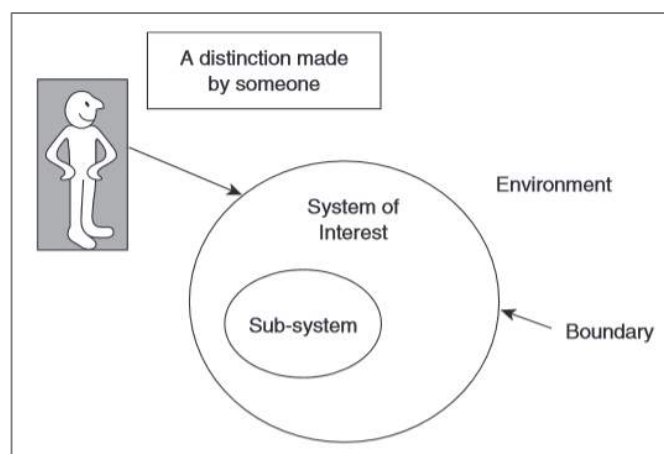


Figure 5 : Éléments clefs d'une pensée systémique dans des situations qui apparaissent complexes (Ison, 2008)

Ison (2008), se basant sur les travaux de P.B. Checkland dans les années 1980 (voir notamment Checkland, 1981) explique que la systémique (*system thinking*) est plus utile à la recherche action si elle est considérée comme une **épistémologie** (*soft system thinking*), c'est-à-dire comme une perspective, une posture d'analyse du monde. Dans ce cas, les chercheurs assument le fait que les systèmes qu'ils définissent sont des artefacts conceptuels pour analyser une situation (« *a distinction made by someone* ») qui n'a d'intérêt que par rapport à leur(s) questionnement(s).

Cette posture s'oppose aux analyses courantes dans les domaines des sciences déterministes et de l'ingénierie technique, qui considèrent les systèmes comme des **ontologies** (des accès directs au monde). Avec cette approche on suppose que les représentations des systèmes, ou modèles, sont les seules possibles. Ison (2008) précise que la pratique de la systémique comme une épistémologie dans la recherche action a pour principal désavantage de ne pas proposer de solution finalisée, mais permet plutôt de clarifier les questionnements pour amener les chercheurs à instruire de nouveaux questionnements leur permettant d'avancer vers une meilleure situation.

Dans mes travaux, je mobilise la systémique comme une épistémologie. Cela m'amène d'une part à clarifier mes choix de représentation du monde en fonction de mes questions de recherche, et d'autre part à laisser de côté des priorités propres à certains acteurs (ex. la révision des DOE, la construction de barrage) pour me concentrer sur mon questionnement : celui de la gestion de l'eau par la demande.

Pour définir mon objet de recherche, je me réfère plus précisément aux concepts de système socio-écologique (Ostrom, 2009) et de systèmes complexes multi-niveaux afin d'analyser et de représenter la complexité des situations de gestion de l'eau dans les territoires irrigués. Concernant l'espace agricole, j'ai mobilisé les deux essais de théorisation de l'agronomie territoriale pour positionner la nature de mes travaux de modélisation de la distribution spatiale des systèmes de culture.

3.2.2 Définir l'objet d'analyse : le système Socio-Agro-Hydrologique

Ostrom (2009) propose un cadre conceptuel pour analyser les systèmes socio-écologiques (SSE). Il représente ces systèmes complexes comme un ensemble de quatre sous-systèmes en interactions pour appréhender les problèmes de gestion des ressources naturelles : (1) le système de ressource (ex. le réseau hydrographique), (2) le système des unités de ressource (ex. les volumes d'eau), (3) le système de gouvernance (ex. la restriction des usages), (4) le système des usagers (ex. individuels ou collectifs, utilisateurs de l'eau). Auparavant, Anderies, Janssen, & Ostrom (2004) ont souligné le rôle et l'importance des infrastructures (ex. barrages, réseaux hydrauliques) dans le fonctionnement des SSE.

Je considère les SSE et les systèmes agricoles comme des « systèmes complexes multi-niveaux emboîtés » (*complex hierarchical nested system* dans Ewert et al., 2011). Ce cadre conceptuel propose de décomposer le système global en différents niveaux hiérarchiques clefs pour la question traitée. Chaque niveau est composé de sous-systèmes (« *holons* ») en interaction entre eux et avec les sous-systèmes de niveaux inférieurs et supérieurs. Cette décomposition en niveaux hiérarchiques peut être réalisée par domaine d'intérêt (ex. écologie, économie, social, institutionnel), et dans ce cas les interactions s'opèrent entre niveaux et domaines (Ewert et al., 2011).

Dans mes travaux, je conceptualise les crises de gestion quantitative de l'eau comme un problème de gestion des ressources naturelles qui émerge au sein d'un type particulier de SSE que je nomme système « socio-agro-hydrologique » (SAH). Cette terminologie permet de mettre en lumière les trois grands domaines du SSE que j'aborde via mes questions de recherche : la gouvernance de l'eau (« Socio »), l'agriculture (« Agro »), l'hydrologie (« Hydro »). Ce système SAH, considéré comme un système multi-niveaux s'organise par domaine :

(1) **Le domaine de l'agriculture** : les parcelles, les groupes de parcelles (parcelles avec les même SdC au sein d'une exploitation), les groupes d'irrigation (les parcelles d'une exploitation irriguées avec le même équipement), le territoire d'exploitation, les bassins de production (ex. zones protégées pour la production de semence), le paysage agricole (voir ci-dessous) ;

(2) **Le domaine de la gouvernance de l'eau** : les secteurs de restriction, les zones de restriction, les masses d'eau impactées par les lâchers de barrage. Les infrastructures hydrauliques permettent de lier les parcelles du paysage agricole et les différents niveaux de ce domaine ;

(3) **Le domaine de l'hydrologie** : les ressources en eau, les Unités de Réponse Hydrologiques (*Hydrologic Response Units*¹³), les sous-bassins versants et le bassin versants. Les ressources en eau considérées sont : les cours d'eau, les nappes d'accompagnement alluviales, les lacs/retenues privés et les barrages sous maîtrise d'ouvrage ou gestion publique.

J'explique avec précision ces différents niveaux dans l'article numéro 3 présenté dans la thèse.

3.2.3 Le paysage agricole pour décrire les liens entre ressources et systèmes de culture

L'agronomie du territoire (*landscape agronomy* dans Benoît et al., 2012; *agronomie territoriale* dans Caron, 2005) cherche à répondre à un des enjeux majeurs de l'agronomie du 21^{ème} siècle : comment considérer les échelles territoriales dans l'analyse des systèmes agricoles (Lardon et al., 2012, Chapter 12 in Darnhofer, Gibbon, Dedieu, & Editors, 2012). Caron (2005) explique que l'agronomie territoriale analyse l'impact du fait technique directement sur les territoires, dépassant ainsi la représentation classique de l'agronomie : la parcelle et l'exploitation.

« Elle s'inscrit dans un courant de réflexion dépassant l'agronomie et se reconnaissant dans le terme d'ingénierie des territoires » (Caron, 2005)

Dans la description qu'en propose cet auteur, les systèmes de production et le fait technique qu'ils induisent, sont à la fois *révélateurs* et *organiseurs* de l'espace rural : ils sont à la fois le miroir des spécificités de leur environnement, et peuvent le façonner au gré de leurs évolutions. Selon lui donc, réfléchir l'agronomie à l'échelle du territoire c'est concevoir ou reconcevoir ce territoire. Le terme d'ingénierie prend ici tout son sens.

Benoît et al. (2012) introduisent le concept de paysage agricole pour mieux comprendre et repenser les interactions entre les systèmes de production et les ressources naturelles (impacts environnementaux, d'une

¹³ Terminologie issu du modèle SWAT (cf. article 3) : zones de pédologie, de couverture du sol et de pente homogène

part, et services écosystémiques, d'autre part). Ils définissent le paysage agricole comme l'espace sous influence des activités agricoles. Ils le présentent comme l'un des éléments du territoire agricole, avec, d'une part, les pratiques des agriculteurs et, d'autre part, les ressources naturelles sur le territoire (modèle ALaDyn dans Benoît et al. 2012, voir

Figure 6). Ils mettent en avant deux interactions principales : (1) Les agriculteurs réfléchissent leurs pratiques en fonction de leur perception de l'état des ressources naturelles et du paysage agricole, et (2) les pratiques des agriculteurs impactent les patrons du paysage agricole et/ou les ressources naturelles.

Les auteurs soulignent l'importance de décrire la composition et la configuration du paysage agricole. En effet, de la même façon que Caron (2005), ils expliquent que celui-ci est façonné par ses interactions avec le milieu et les pratiques.

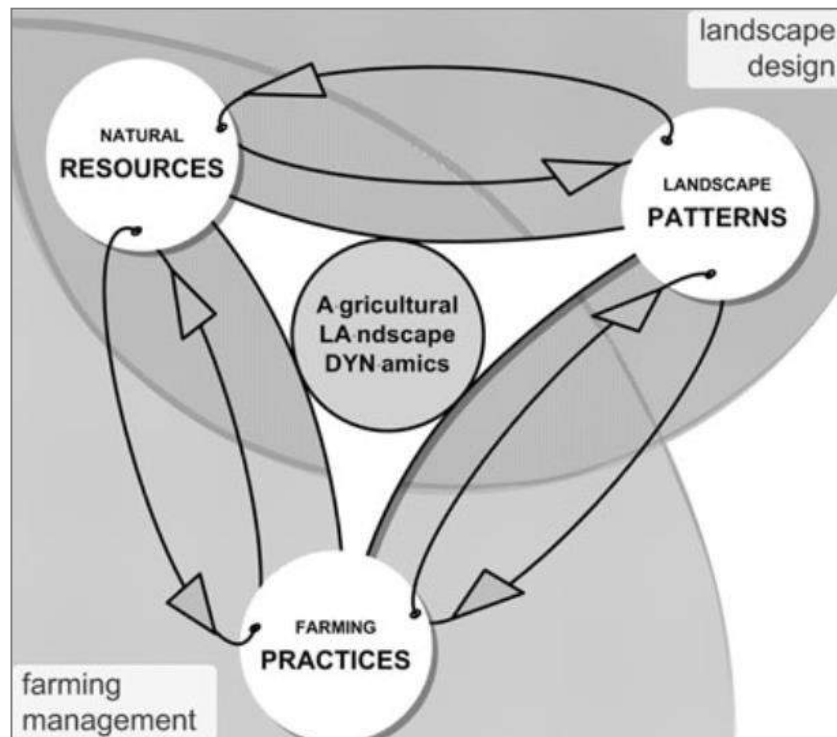


Figure 6 : The conceptual model of agricultural landscape dynamics (ALaDyn), structuring the relationships between natural resources, landscape patterns, and farming practices (Benoît et al., 2012)

Benoît et al. (2012) mettent aussi l'accent sur l'utilité des approches spatiales pour passer d'une analyse à l'échelle de la parcelle ou de l'exploitation vers des niveaux d'organisation supérieurs tels que le bassin versant ou le territoire à enjeu.

Ces conceptualisations de l'agronomie du territoire m'ont été utiles pour conceptualiser les caractéristiques du domaine agricole à représenter dans le SAH. Plus particulièrement, elles m'ont aidé à représenter la distribution spatiale des systèmes de culture. A l'image de Benoît et al. (2012), je considère que le paysage agricole est à la fois la résultante des pratiques agricoles et qu'il les détermine. Plus précisément les composantes biophysiques (ex. les sols, le réseau hydrologique, la position des retenues, les réseaux hydrauliques) et les unités de gestion agricole (ex. les groupes d'irrigation, les exploitations) sont déterminants de la distribution spatiale des systèmes de culture¹⁴. Considérant les interactions entre le paysage et les pratiques, la distribution spatiale des systèmes de culture définit aussi les caractéristiques du paysage au fur et à mesure des cycles de végétation des cultures

¹⁴ Voir notamment le concept de *cropping system determinant* dans l'article 1

et des années. Les stratégies d'irrigation (de prélèvements agricoles) sont déterminées par les interactions entre les dynamiques spatio-temporelles de la végétation agricole et la dynamique de l'eau des sols. Ma représentation du domaine agricole dans le système SAH a consisté en la représentation du paysage agricole. Ce paysage est composé des éléments déterminants de la distribution spatiale des systèmes de culture mais aussi de la composition du paysage au fur et à mesure des saisons culturales et des années.

3.3 Mobiliser les acteurs

3.3.1 Pourquoi la participation ?

Stirling (2006) prône l'usage de méthodes participatives dans la recherche pour des raisons **normatives** (le droit à la participation), **substantives** (améliorer la qualité des connaissances) et **instrumentales** (améliorer la confiance et l'acceptation des décisions). Rejoignant Stirling sur l'aspect normatif de la participation, Jakku & Thorburn (2010) expliquent que l'utilisation généralisée de ces méthodes doit faire partie du changement de paradigme dans l'accompagnement de l'innovation en agriculture depuis des approches dites « *top-down* » vers des approches dites « *bottom-up* ».

Sur la base de leurs expériences, Barreteau, Bots, & Daniell (2010) soulignent le potentiel des méthodes participatives à produire une science utile. Ils expliquent que la participation influence positivement l'opérationnalité des connaissances scientifiques produites en améliorant leur pertinence, leur validité et leur acceptabilité dans le contexte social. Sur l'utilité des connaissances produites, Cash et al. (2002) expliquent que pour que les connaissances scientifiques soient utiles aux acteurs auxquels elles sont destinées, celles-ci doivent être **saillantes**¹⁵ : répondre directement aux besoins des acteurs, **crédibles** : reconnues par les acteurs comme fondées, et **légitimes** : respecter la diversité des points de vue et valeurs des acteurs. Dans le travail présenté ici, j'ai considéré que les méthodes participatives sont un moyen de s'assurer que les résultats de la recherche répondent à ces trois caractéristiques et donc puissent être utiles à la société.

Salter, Robinson, & Wiek, (2010) ajoutent que les méthodes participatives sont particulièrement adaptées pour aborder les problèmes complexes des systèmes homme-environnement (ou SSE). Pour eux, c'est avant tout un objectif substantif qui justifie l'usage de la participation. En effet, le processus participatif permet d'aborder les dimensions normatives et sociales des systèmes où se mêlent société et environnement, là où la science déterministe et les modèles mathématiques proposent des connaissances limitées.

van Asselt & Rijkens-Klomp (2002) proposent une typologie des approches participatives selon deux axes : (1) l'axe des aspirations/motivations, qui oppose le participatif comme un « moyen » au participatif comme un « objectif » ; et celui (2) des objectifs de production, qui oppose des objectifs de consensus et de mise en lumière de la diversité des points de vue.

Dans mon projet de thèse, je me suis surtout intéressé au potentiel des méthodes participatives pour améliorer la représentation et la compréhension des SSE, et pour la production d'une connaissance utile et mobilisable pour les acteurs (aspects substantif et instrumental). Ainsi, ces méthodes ont permis d'accéder aux connaissances locales sur la structure et les dynamiques du système SAH, et de produire des résultats de recherche (le modèle, les alternatives) qui répondent aux questionnements des acteurs. Ces résultats sont ainsi acceptables à la fois du point de vue de la nature des connaissances produites et de leur mode de production. Je positionne mon approche des méthodes participatives comme un moyen permettant d'éclairer la diversité des points de vue sur le problème de gestion des ressources naturelles abordé. En revanche, je n'ai pas construit

¹⁵ Traduction du terme anglais *salient*, au sens d'adapté

mon dispositif pour favoriser l'émergence d'une solution partagée au problème de la gestion quantitative de l'eau.

3.3.2 Quel type de participation?

Je me suis basé principalement sur le travail présenté par Barreteau, Bots, & Daniell (2010) pour cadrer mon approche méthodologique de la participation et définir les formes qu'elle prendrait dans la méthodologie que j'ai développée. Ces auteurs ont en effet cherché à clarifier les éléments à planifier lors d'un processus de recherche participative afin d'éviter que le processus lui-même, ou ses résultats, soient rejetés par ses potentiels utilisateurs.

Ils proposent de concevoir la recherche participative comme un **processus long** où se succèdent de nombreuses séquences d'interaction entre le monde scientifique et les acteurs d'un problème de gestion des ressources naturelles. Ils identifient des cycles au sein du processus composés d'étapes clefs (i) la formulation ou la reformulation d'une question posée, (ii) le choix de méthodes pour y répondre et (iii) l'analyse des résultats qui amènent éventuellement à prendre des décisions d'ordre politique et/ou à reformuler de nouvelles questions. Pour ces auteurs, chaque formulation d'une nouvelle question engendre l'utilisation de méthodes participatives adaptées. Ils insistent sur le fait que les questions posées sous-tendent généralement des sous-questions, et présentent donc le dispositif de recherche participatif comme un emboîtement d'étapes cycliques où les méthodes mises en œuvre répondent à la question posée.

Mon dispositif de recherche est organisé suivant cette logique organisationnelle. Il mobilise une diversité de modalités d'interaction avec les acteurs, en cohérence avec mon objectif principal (identifier des alternatives de distribution spatiale des systèmes de culture qui réduisent les crises gestion de l'eau) et spécifiquement adaptées aux sous-questions et aux sous-objectifs qui permettent de les traiter. Pour planifier mon dispositif participatif j'ai donc spécifié explicitement la séquence de sous-questions à traiter et précisé quelle information devait être produite et selon quels moyens. Cette approche amène à décrire, en fonction des étapes planifiées, l'évolution des modalités d'interaction avec et entre les acteurs, et l'évolution du contrôle de l'information dans le temps : comment les flux d'information vont-ils évoluer entre deux étapes (changement d'objectifs, de problématiques, de participants).

Les modalités d'interactions retenues et mises en œuvre sont présentées en détail dans les articles de la thèse. J'ai principalement interagit avec les acteurs sous la forme d'entretiens individuels, d'ateliers de travail hétérogènes et homogènes, avec des approches consultatives ou collaboratives (Barreteau et al., 2010; Bots & Daalen, 2008). Pour faciliter leur description, les méthodes mobilisées sont présentées lorsque je présente ma démarche générale (section suivante).

Je considère que mon projet est en soi un cycle de recherche participative qui peut être repensé si les résultats amènent à reformuler la question posée (voir la notion de « boucle de conception » au paragraphe 3.4.2).

3.3.3 La modélisation pour outiller la participation

Barreteau, Bots, & Daniell (2010), à la suite de nombreux auteurs (Bousquet et al., 1999; Star & Griesemer, 1989; van Paassen, 2004; Vinck, 1999), mettent l'accent sur l'importance des modèles dans les processus participatifs à l'interface science-société. Ils considèrent notamment les modèles comme faisant partie du collectif participatif, défini comme un réseau de 4 nœuds de convergence (« nodes ») : les parties prenantes (*Stakeholder*, S), les décideurs (*Policy maker* ou, P), les chercheurs (*Researcher*, R), et le(s) modèle(s) (*Model*, M). La

Figure 7 illustre ces flux potentiels entre acteurs des recherches participatives.

Pour justifier cette posture, les auteurs s'appuient sur la Théorie de l'Acteur-Réseau (Latour, 2005), qui positionne les objets au même niveau que les acteurs humains dans les réseaux sociaux. Ils avancent que ces objets interagissent avec le tissu social. Pour ces auteurs, dans un processus participatif, le modèle reçoit de l'information, la filtre et de la distribue aux autres acteurs. L'auteur précise que classiquement, les modèles sont en premier lieu des objets intermédiaires pour les personnes qui les renseignent et les construisent, et peuvent devenir un fournisseur d'information lorsqu'ils sont utilisés (un outil de gestion).

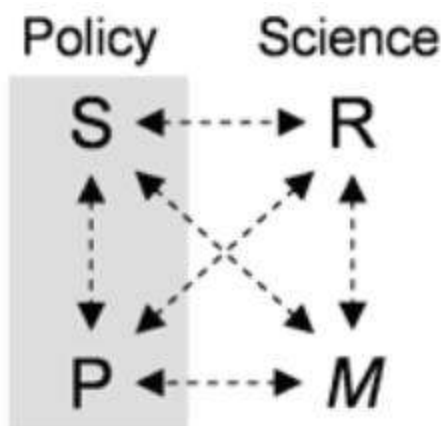


Figure 7 : Représentation du flux d'information possible dans un collectif pour un dispositif de recherche participative: R Researcher, M Model, P Policy maker, S Stakeholder). Dans Barreteau et al. (2010)

Je définis les modèles comme la représentation suffisamment stable d'un système pour servir de base à une discussion sur ce que le système représente. Ainsi, le modèle peut constituer une information formatée (des schémas, des SIG, des jeux, des maquettes) ou un moyen de fournir/traiter de l'information sur le comportement d'un système (des équations mathématiques, des codes informatiques). Cette définition a l'avantage d'être large et d'englober de nombreuses formes de modèle. En retour, les auteurs conseillent de préciser le type de modèle selon son rôle dans une méthode participative. Ils différencient **les modèles méthodes**, qui outillent une méthode (ex. simulateurs, jeux de rôle) ou sont eux-mêmes une méthode (ex. évaluation économique), et les **modèles résultats** qui font partis des résultats ou sont le résultat de travaux participatifs.

En fonction de l'étape de la démarche de conception-évaluation et du mode d'interaction avec les acteurs du terrain, le terme modèle peut se référer à toute représentation d'une réalité, qu'elle soit numérique ou conceptuelle, statique ou dynamique (cartes, simulation), matérielle (système de territoire) ou abstraite (système de valeurs). Dans mon dispositif participatif, j'envisage la modélisation comme une méthode pour intégrer les connaissances et informations, et pour faciliter l'échange de connaissances et l'élicitation des visions des acteurs. J'ai donc créé plusieurs modèles dont la forme et la finalité varient : représentation de la structure du paysage agricole, modélisation des décisions d'agriculteurs, cartographie de l'impact des alternatives de distributions spatiales des systèmes de culture, et me suis attaché à ce que les modèles utilisés dans les étapes de travail interactif fournissent une référence visible/plastique (manipulable), compréhensible à tous les acteurs.

3.4 Gérer l'échange de connaissances

3.4.1 Une approche constructiviste

Parce qu'ils résultent d'interactions entre les différents niveaux et domaines des SSE, les problèmes de gestion des ressources naturelles devraient être analysés suivant une approche qui mobilise les différentes disciplines scientifiques et parties prenantes clés du système (Giampietro, 2002; Reed, 2008). Ceci nécessite de développer des démarches méthodologiques qui permettent d'articuler les connaissances, les points de vue et les valeurs existantes sur le sujet abordé.

Pour les auteurs des sciences post-normales (*post-normal science*, voir par exemple Funtowicz & Ravetz, 2003; Giampietro, 2002; Madrid, Cabello, & Giampietro, 2013), traiter d'un objet complexe avec une approche transdisciplinaire sous-entend d'accepter qu'il existe plusieurs conceptions de la réalité (constructivisme) et d'abandonner l'idée qu'il existe une solution générique (positivisme). Les démarches proposées dans ce cas doivent donc permettre aux collectifs acteurs-chercheurs de chercher ensemble une solution acceptable et partagée parmi une diversité d'options, plutôt que de permettre le calcul de solutions optimales (Giampietro, 2002). Les scientifiques sont alors en charge de développer des modes d'interaction avec les acteurs et des objets intermédiaires¹⁶ qui permettent aux parties prenantes de concevoir des modes de gestion alternatifs et de les comparer.

3.4.2 Les sciences de la conception

Les sciences de la conception ("Sciences of Design" voir Hatchuel & Weil, 2002; Martin, Martin-Clouaire, & Duru, 2012; Nassauer & Opdam, 2008; Tittonell, 2013) présentent les activités de conception comme un moyen pour gérer l'interface science-société dans les dispositifs participatifs. Comme l'illustre la Figure 8, avec les travaux de conception, les problèmes pratiques influencent les questionnements scientifiques et ainsi les outils et les connaissances développés sont plus utiles pour l'action.

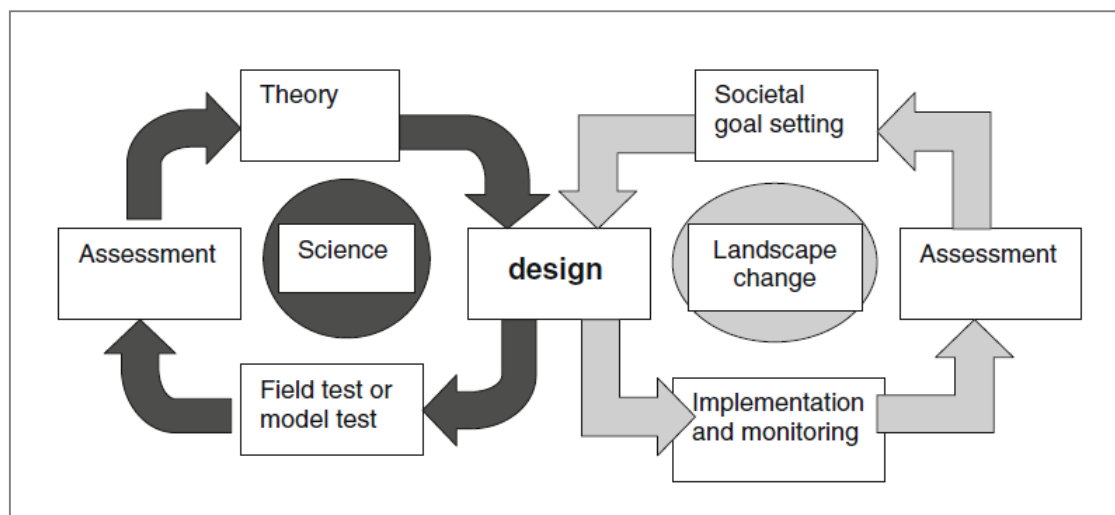


Figure 8 : Design as a link between science and landscape change (Nassauer & Opdam, 2008)

Dans un processus de conception, porté/animé par des scientifiques, les modèles sont souvent utilisés comme objets intermédiaires. Ils servent alors à représenter la situation de départ (e.g. l'objet à reconcevoir) voire même à outiller l'évaluation des alternatives conçues. De nombreux exemples d'utilisation de modèles existent déjà dans le domaine de la gestion de l'eau (Leenhardt et al., 2012; Letcher, Croke, & Jakeman, 2007; Jakeman & Letcher, 2003).

Dans mon projet de thèse, j'ai appliqué la posture des sciences de la conception à l'échelle du système SAH. J'ai développé une démarche de conception-évaluation participative, basée sur l'utilisation de modèles, en trois étapes :

- (1) Représenter le système dans sa situation actuelle ;
- (2) Concevoir des alternatives au système ;

¹⁶ "a sort of arrangement that allows different groups to work together without consensus" dans Leigh Star, 2010

(3) Evaluer le système conçu.

Comme le proposent Nassauer & Opdam (2008), pour concevoir des paysages (*landscape design*), vu la complexité de l'objet manipulé, j'ai proposé un dispositif qui permette d'aborder la complexité de manière progressive et itérative. Ce dispositif est basé sur des allers retours entre terrain et laboratoire pour permettre l'expression des connaissances et des idées par les acteurs (sur le terrain), puis la formalisation/modélisation des connaissances et des idées exprimées (en laboratoire), et enfin la validation de ces formalisations par les acteurs. Au sein de chacune des 3 étapes de la méthodologie, le groupe de chercheurs a eu pour responsabilité de mettre en œuvre des méthodes d'élicitation des connaissances (explicites, implicites et tacites) valeurs ou visions exprimées par les acteurs, puis d'en construire une représentation stable et quantifiée (« formalisée ») pour la confronter à leurs propres représentations.

Pour ce travail, j'ai limité le test de la méthodologie à l'application d'une boucle de conception-évaluation c'est-à-dire à la réalisation des 3 étapes Représenter-Concevoir-Evaluer. Bien que durant l'étape 2 (conception) les acteurs aient exprimé des visions de changement sur différents domaines du système SAH (ex. changements des règles de gestion des barrages), j'ai focalisé mes travaux sur la formalisation d'alternatives de paysage agricole, et plus particulièrement sur la distribution spatiale des systèmes de culture dans le paysage. Ce choix a été fait au regard de la question appliquée que j'ai choisi de traiter (Cf. section 3.2.1) mais aussi de mon orientation disciplinaire : l'agronomie du territoire. Il est également lié aux contraintes de temps et de moyens disponibles. Il ne remet pas en cause l'importance de traiter aussi la question de la représentation des autres domaines du SAH pour évaluer les impacts des changements dans les systèmes de culture sur le système dans son ensemble. Cela ne remet pas non plus en question l'importance de traiter du changement dans les autres domaines du système SAH dans un autre dispositif de recherche que celui de ma thèse.

En revanche, le simulateur construit et utilisé dans la troisième étape d'évaluation des alternatives simule le fonctionnement de l'ensemble du système SAH considérant différentes distributions spatiales de systèmes de culture. Ce simulateur permet donc d'analyser les effets de ces changements sur les trois domaines du système SAH, aux différents niveaux d'organisation clefs de chacun d'entre eux.

4 La démarche de conception-évaluation proposée

La démarche mise en œuvre pendant le projet de doctorat articule 3 étapes principales, illustrées par les trois articles présentés dans la deuxième section de la thèse :

1. Co-construction d'un modèle du système socio agro-hydrologique distribué, qui représente les dynamiques de la demande d'irrigation ;

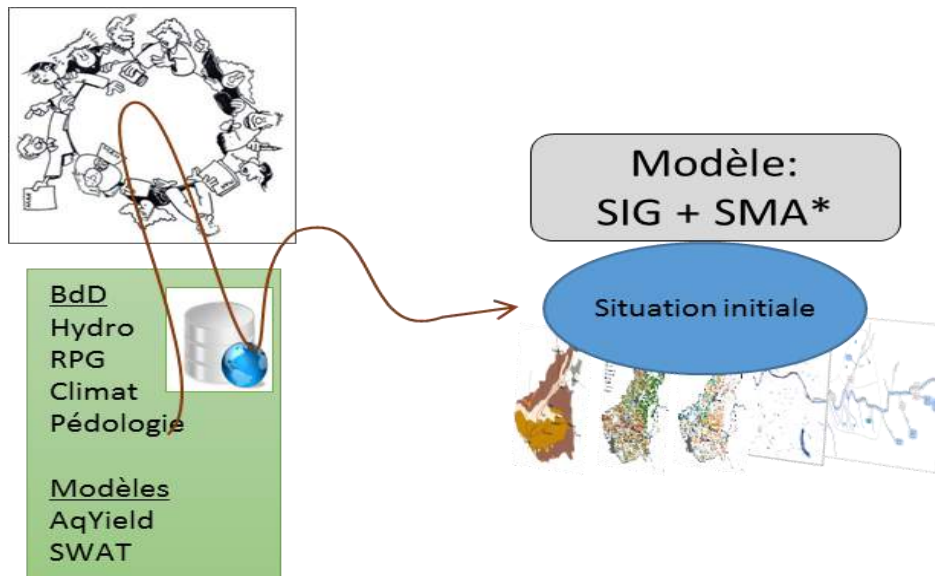


Figure 9 : Etape 1 de la démarche de conception-évaluation mise en œuvre.

La figure 8 décrit la première étape de la démarche de conception-évaluation mise en œuvre et explicitée dans l'article 1. Un cheminement méthodologique pour l'hybridation des connaissances génériques et locales permet d'abord de construire un modèle du SAH, formalisé en un SIG en entrée d'un modèle de simulation multi-agent (SMA). Un travail de validation des sorties est ensuite conduit avec des experts locaux.

2. Co-conception de systèmes socio agro-hydrologique alternatifs, se concentrant sur des distributions spatiales de systèmes de culture, et formalisation ;

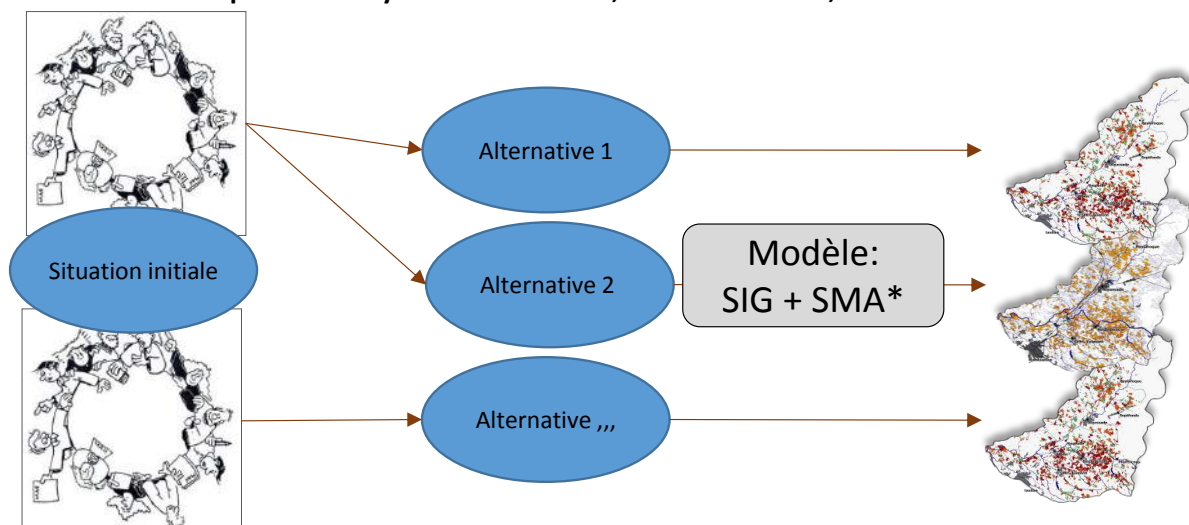


Figure 10 : Etape 2 de la démarche de conception-évaluation mise en œuvre.

La figure 9 décrit la deuxième étape de la démarche de conception-évaluation mise en œuvre et décrite dans l'article 2. Deux groupes d'acteurs, de visions *a priori* divergentes, conçoivent chacun une ou plusieurs alternatives qui prennent en compte les contraintes des systèmes agricoles et de gestion de l'eau. Le chercheur utilise le modèle construit en étape 1 comme objet intermédiaire pour clarifier et valider les visions. Il les formalise ensuite en jeu d'entrées pour le SMA.

3. Simulation des alternatives pour évaluer leur potentiel à mettre en adéquation les dynamiques de demande et d'offre de la gestion de l'eau

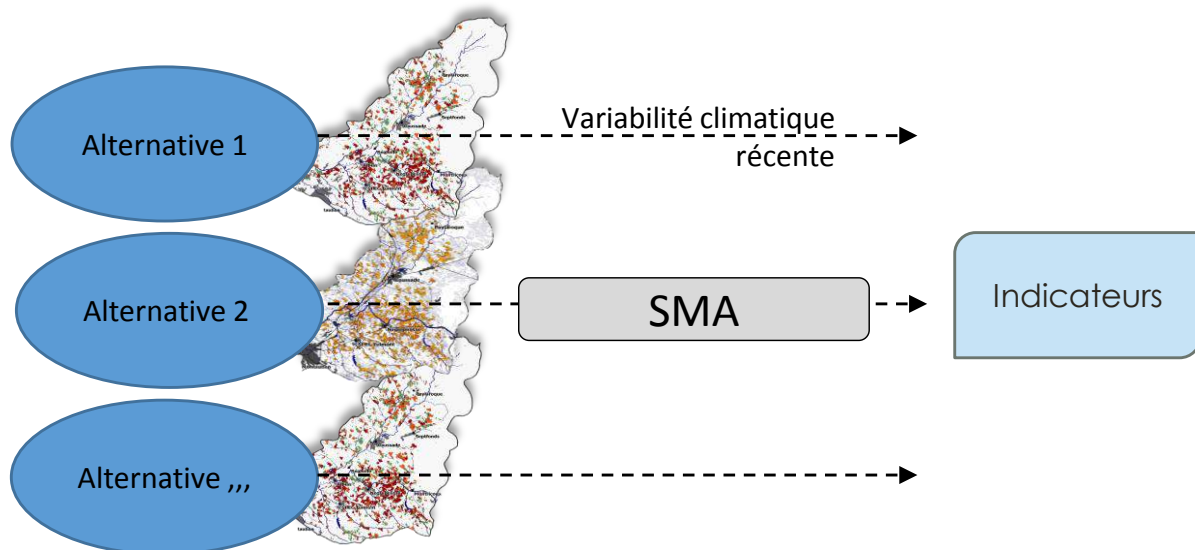


Figure 11 : Etape 3 de la démarche de conception-évaluation mise en œuvre.

La figure 10 illustre l'étape 3 de la démarche de conception-évaluation décrite dans l'article 3. En laboratoire, les alternatives sont simulées sur une série climatique observée récente (2000-2011). Les sorties sont analysées et présentées sous forme d'indicateurs agrégés aux niveaux spatiaux, organisationnels et temporels qui intéressent les participants pour évaluer leur potentiel à réduire le risque de passage sous le DOE.

Ces trois étapes doivent être comprises comme des phases de travail interdépendantes, conduites avec de nombreuses itérations. Elles constituent un premier cycle de conception-évaluation qui pourrait être répété afin d'affiner le modèle du système SAH et les alternatives conçues en fonctions des conclusions de la phase de simulation-évaluation.

5 Le territoire irrigué étudié: l'Aveyron aval

J'ai choisi de tester la méthode présentée ci-dessus sur le bassin versant de l'Aveyron. Ce dernier a été choisi, après consultation de l'Agence de l'eau Adour-Garonne, pour sa représentativité des enjeux de gestion quantitative de l'eau parmi les sous-bassins du BAG, tant dans leurs dimensions stratégiques (déséquilibre structurel) qu'opérationnelles (restrictions récurrentes et stocks d'eau limités pour le soutien d'étiage). Le bassin de l'Aveyron présente en effet un déséquilibre structurel en eau estimé à 6,7 million de m³¹⁷. Il en résulte un contexte social tendu autour de la gestion quantitative de l'eau, opposant les représentants de la profession agricole et les diverses organisations en charge ou ayant intérêt à l'application de la LEMA. Le projet de PGE a

¹⁷ L'étude Agence de l'eau Adour-Garonne pour la détermination des volumes prélevables (Daubas & Dupuis, 2009) fait état d'un déficit de 6,7 hm³ à 13 hm³ selon que l'on se base sur les chroniques de débit mesuré de 1966-2006 ou 2000-2006 (le début des années 2000 était sec)

d'ailleurs été avorté en 2009, en rapport avec l'abandon du projet de construction d'un barrage (projet « Vimenet », pour plus de détail voir Gaulupeau, 2010).

Afin de soulager le déficit, un consortium alliant l'Agence de l'Eau et les conseils généraux du Tarn, du Tarn et Garonne et de l'Aveyron finance l'achat de stocks d'eau à EDF depuis 2012, à hauteur de 5 millions de m³ disponibles annuellement¹⁸. Cela permet de réduire le déficit estimé à 2 hm³. Le DOE n'est cependant pas respecté, il a par exemple été franchi 34 jours en 2012. Le déséquilibre du bassin est dû principalement aux prélèvements pour l'irrigation dans sa partie aval, estimés en moyenne à 18 millions de m³ annuels, soit 80% des prélèvements pour l'irrigation sur le bassin total pour seulement 16% de sa surface.

J'ai donc choisi de me concentrer sur ce territoire pour mon projet de conception et évaluation. J'ai délimité une zone d'un peu plus de 800 km² par agrégation des sous-bassins versants couvrant les paysages agricoles irrigués sur les terrasses de l'Aveyron et les coteaux alentours. Le paysage présente une certaine diversité de systèmes de production, avec de la culture de céréales, d'oléagineux, de protéagineux et de maïs, de nombreuses zones de fruticulture irriguée et de production de semence sous contrat (maïs principalement). L'élevage est en déclin. Il se concentre essentiellement sur les zones les moins productives des coteaux et des causses, en amont des sous-bassins. La surface agricole utilisable est de 38 500 ha, partagée entre 1 150 exploitations dont 43% sont irriguées sur, en moyenne, 38 % de leur SAU¹⁹.

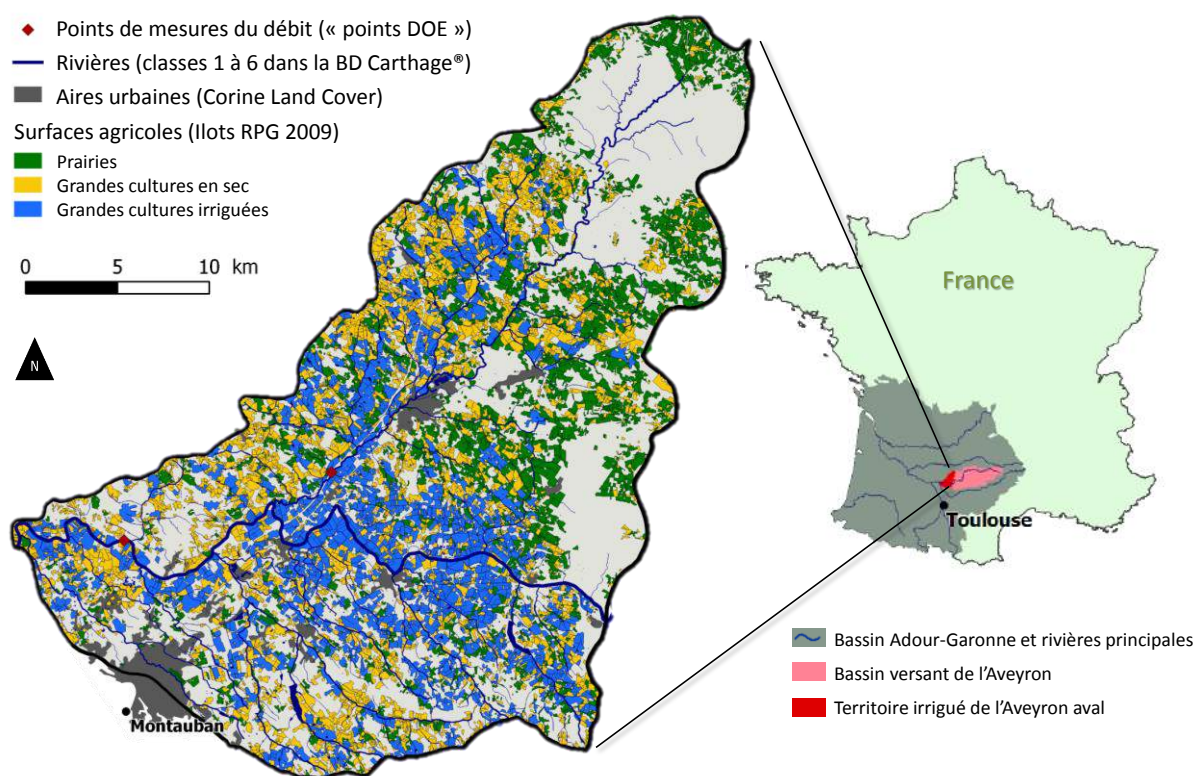


Figure 12 : Localisation et présentation du territoire irrigué à l'aval de l'Aveyron

¹⁸ La facture s'élève entre 57 k€ (forfait si il n'y a pas de déstockage) et 500 k€ euros en fonction du stock mobilisé au cours de l'étiage. Elle est prise en compte à hauteur de 80% par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne depuis 2011

¹⁹ Données issues de traitements du Registre Parcellaire Graphique en 2009, mis à disposition par l'Agence de Services et de Paiements (voir www.asp-public.fr/?q=node/856)

Partie II (Articles)

Les étapes de la démarche de conception évaluation



Figure 13 : Photo prise lors d'un atelier de conception à la DDT 82

Etape 1:

Hybridizing local and generic information to model cropping system spatial distribution in an agriculture

Clément Murgue*, Olivier Therond, Delphine Leenhardt

Agronomie, INRA UMR AGIR, 24 chemin de Borderouge, B.P. 52627, F-31326 Castanet-Tolosan, France

*corresponding author: clement.murgue@toulouse.inra.fr, Tel.: +33.5.61.28.50.43

Keywords

Landscape agronomy, farming practices, mixed methods, irrigation, perception-based regional mapping

Abstract

In quantitative water management, analysing spatial and temporal interactions between cropping systems and water resources is useful for taking site-specific problematic withdrawal situations into account. It is a methodological challenge to do it at the scale of the management units where the crises are measured: large areas of either administrative or hydrological coherence. In this paper we present a method based on diverse methods and mixed sources of information to model an agricultural landscape (AL) with a fine-scale representation of the spatial distribution of cropping systems in the landscape. Our approach is based on progressively hybridizing databases and local actors' and experts' knowledge to produce a spatially explicit and dynamic model. The LPIS database is crucial for our method as it provides the spatial and temporal basis of our model: the geographical delineation of islets and information on crop sequences. Local knowledge is mobilized to identify cropping systems' determinants in the AL and to build a generic framework for simulating farmers' crop management strategies dynamically.

The model was qualitatively and quantitatively evaluated using a multi-agent simulation platform (MAELIA). We asked local experts on quantitative water management to evaluate the ability of the platform to reproduce intra- and inter-annual dynamics at different levels of the AL when using our model of the AL as input. We discuss the method's contribution to current challenges in modeling large agricultural areas and the associated tradeoffs.

Introduction

Farming practices depend on and interact with natural resources, not only at the field level (Ittersum & Rabbinge, 1997) but also at larger scales, such as landscapes or watersheds. In line with this, the field of landscape agronomy analyzes these interactions at the landscape level (Benoît et al., 2012). Particularly in agricultural landscapes (AL) dominated by crops (i.e. not by pasture), the nature and spatial distribution of cropping systems (CS) strongly influences the status and management of natural resources (Leenhardt et al. 2010). For example, in irrigated areas, sowing dates and irrigation intensity influence the timing and severity of hydrological droughts (Clavel, Soudais, Baudet, & Leenhardt, 2011; Maton, Leenhardt, & Bergez, 2007). Sebillote (1990) defines a CS as a set of technical operations that a farmer applies to a set of identically managed fields. It is fully described by

the sequential choice of species and cultivars (crop sequence), and, for each crop in the crop sequence, by the annual crop management strategy (CMS).

Currently, a scientific challenge exists in developing methods to understand and model the spatial distribution of CS in large agricultural regions (Leenhardt et al., 2010). While methods that describe land cover changes are widely explored, the current challenge is to develop methods that describe land use and associated dynamics (Rounsevell et al., 2012; Verburg et al., 2009). In studies considering large AL, the description of CS is most often restricted to the description of cover species (without any information about crop sequences) and the same CMS is used for the entire area covered by a given crop species (Therond et al., 2011). In some studies, the concept of crop rotation is introduced, but the CMS remains simplified (Gaucherel et al., 2014; Houet et al., 2014; Mignolet et al., 2009; Overmars, Verburg, & Veldkamp, 2007; Verburg et al., 2002). Frequently, technical operation dynamics are described as a sequence of fixed dates that do not vary, regardless of intra- and inter-annual weather variability (Therond et al., 2011). These simplified representations of CS are often endured by modelers due to a lack of information, but objectively, all farming practices that strongly interact with the natural resource issue studied should be finely described within and between years (Leenhardt et al., 2010). We posit that today, the core challenge in modeling AL is developing methods that integrate heterogeneous sources of information in order to build adapted, fine-scale representations of CS spatial distribution.

The development of computer technology launched an era of mass information: from raw statistics or measurements in the form of databases or pre-processed in information systems, data are numerous. Hence, it has great potential for modeling AL. Because it is generic, this information is incomplete and often must be adapted to make it locally operational. For example, in AL studies, data on farming systems from national statistics often appears spatially heterogeneous, insufficient, and sometimes not precise enough for use at the local case-study level. However, the knowledge held by local actors of an AL about its structure and functioning is significant and often unexploited, not just because it is difficult to access but also because it is hard to articulate with quantitative, scientific models. Local knowledge could provide key insights for understanding, supplementing or refining generic data. Therefore, a methodological challenge for modeling AL resides in articulating generic information with actors' converging and diverging knowledge of the agricultural domain. Mixing information sources, also called "hybridizing" (see Lardon et al., 2012), is often advocated in the literature of natural resources management to promote the emergence of shared knowledge between scientists and local actors (Meinke et al., 2009; Pahl-Wostl, 2007; Pahl-wostl et al., 2013).

The present study tackles the methodological challenge of mixing information sources to model a large AL. This was developed as an initial step of a broader participatory design-and-assessment method to support the design of alternative irrigated AL to deal with low-flow problems of rivers in deficit (Murgue et al. 2015). First, we present the case study to clarify the need to describe the spatial distribution of CS, including CMS, with fine-scale spatial and temporal resolutions. We then present the "AL modeling method" that allows us to spatialize CS. Hereafter, the AL model represents all landscape elements that determine a cropping system's spatial distribution (CSSD). Next, we demonstrate the resulting fine-scale and dynamic representation and describe the quantitative and qualitative assessment of the final AL model of the water-management issue. Finally, we discuss the method's contribution to the current challenges of modeling large agricultural areas.

1 Material and methods

1.1 Case study

We chose the Aveyron watershed, southwestern France, as a case study (Figure 14) because its river's discharge is frequently and persistently measured under the legal threshold (many times a year, year after year). The intensity of water deficits in this area is measured and managed daily through water release from dams and water use restrictions. It depends highly on the dynamics of irrigation withdrawal demand. While these deficits are measured at several hydrological nodal points, they result from daily site-specific interactions between farmers' CMS, soil water content, water resources, weather variability and even normative decisions (e.g. releases from upstream dams and withdrawal restrictions). Potentially, only a few challenging withdrawal situations trigger an overall imbalance at basin level. There is a strong need to produce a fine-scale spatial description of the current CSSD to identify, characterize and manage causes of these recurrent deficits. This includes a dynamic description of cropping practices that might influence intra-seasonal withdrawal dynamics: tillage (modifies evaporation dynamics), species (water needs), cultivar choice and sowing date (temporal position of the growth cycle), and irrigation (farmers' strategies). It also includes a description of crop sequences, since it influences inter-annual withdrawal dynamics at the field level.

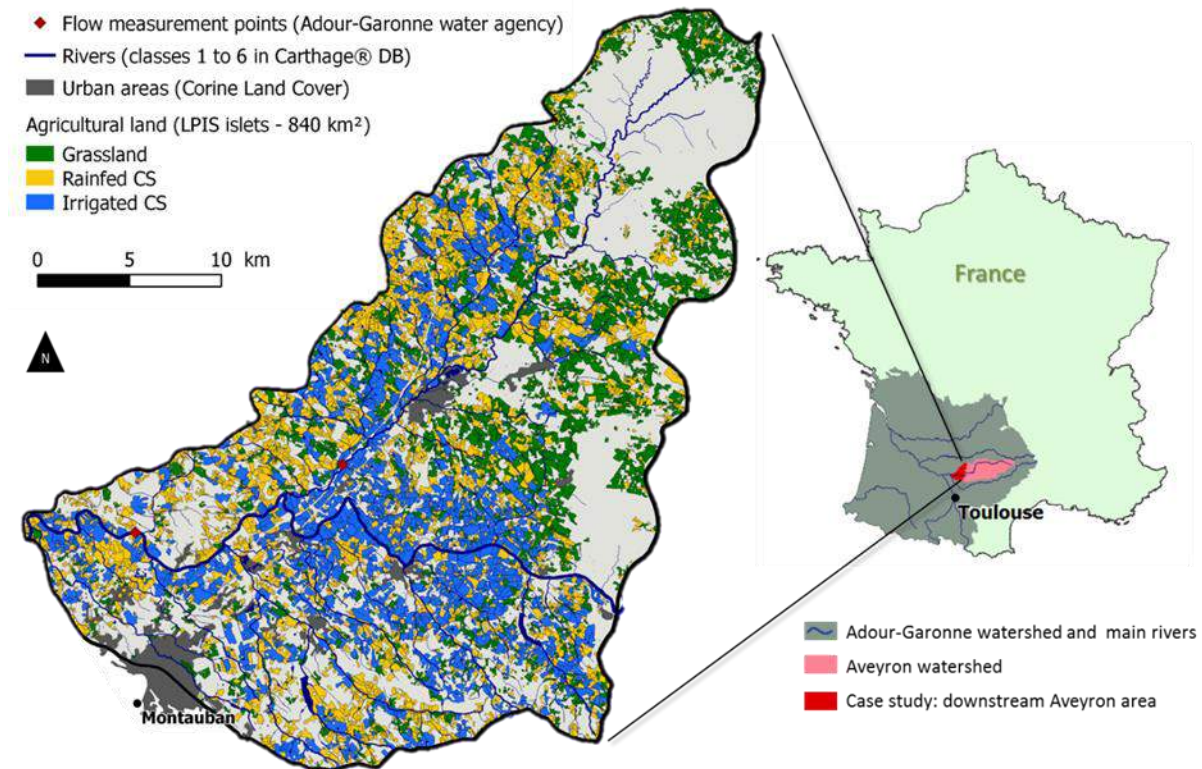


Figure 14. Location and land-use map of the case study (downstream of the Aveyron River basin) located in the Adour-Garonne basin (southwestern France). It is composed of hydrological units and covers approximately 16% of the total Aveyron basin. The land-use map delineates agricultural islets in the 2009 French "Land Parcel Identification System" (LPIS) and information extracted from analysis of the 2006-2009 LPISs: grassland, rainfed and irrigated cropping systems. Irrigated islets are those declared irrigated at least once from 2006-2009. Grassland islets are those with only forage or grassland-related declared crops (classes 16,17,18,19 in LPIS).

The AL model presented will be used as a starting point to co-design, along with stakeholders involved in Aveyron basin water management issues, changes in CSSD and in water management that could decrease water deficit problems. In this design process, stakeholders must specify the problematic situations that they believe CS could

or should change, according to agricultural and water management objectives and constraints (e.g. suitability of site-specific soil and farming system constraints of new CS). The alternative AL designed will then be assessed with a multi-agent simulation platform (see below) to assess whether intra- and inter-annual dynamics of water demands would, according to the simulations, decrease day-to-day and year-to-year water deficit problems.

We focused on the downstream portion of the watershed, an irrigated AL of approximately 840 km². The area covers only 16% of the total basin area, but irrigation water withdrawals reach 80% of the total irrigation withdrawals of the entire basin (18 hm³). The landscape is composed of three main pedo-morphologic units: (1) flat alluvial terraces around the Aveyron River and its main tributary, with a gradient from deep alluvium sandy soils to thin hydromorphic loamy silt soils (called “*boulbènes*”), (2) surrounding hillslopes with diverse mixed molassic and calcareous clayey soils including lighter patches of silt, and (3) limestone plateaus with thin and heavy calcareous clayey soils. Rainfed cereals and sunflower dominate the surrounding hillslopes, while irrigated maize dominates the alluvial plain. There are also numerous patches of fruit and high-income seed-production fields. Irrigated agriculture is located mainly on the alluvial terraces and less on the hillslopes. The utilized agricultural area (UAA) is approximately 40,000 ha. There are approximately 1,150 farms, of which 53% use irrigation (French LPIS, 2009).

1.2 Sources of information

In this paper, we distinguish two main types of information: *data* and *knowledge*. By *data*, we refer to both uninterpreted symbolic representations of properties of items in the world (e.g. measurements) and to pre-processed facts collected for reference or analysis in a particular inquiry (e.g. statistics). By *knowledge*, we refer to a piece of information embedded in a context of interpretation. Knowledge “embraces framed experience, contextual information and grounded intuition, and is embedded in routines, practices and norms that may not always be explicit” (Pahl-Wostl et al., 2013).

We also distinguish information sources according to their origin. “Generic” information is produced or validated by scientific or government organizations and may serve many purposes in different domains and levels of analysis. It is acknowledged for its stability and broad distribution and is often referred to as “databases” (e.g. in Voinov, 2010). Typically, they include census data, official statistics, measured or even simulated phenomena from specialized organizations, non-controversial scientific knowledge, conceptual and computer-based models, etc. The generic information we manipulate in our study mainly originates from databases. In contrast, “local” information is developed for a specific purpose in a specific situation and is produced and used by actors when performing daily activities. Here, by local information, we mainly consider “local knowledge”, which derives from experiences of actors of a system (hereafter called “informants”), and “local information systems”, which are available from local administration or non-governmental organizations. As in van Asselt and Rijkens-Klomp (2002), we consider that both generic and local information sources are *a priori* pertinent visions of the world, however restrictive, and accordingly we believe they should be addressed, since they may be complementary.

1.2.1 Local information: provided by experts and actors

Two kinds of informants provided local knowledge: actors involved in the quantitative water management issue and locally recognized experts from the agricultural system. “Expert knowledge” is derived from a strong depth of experience of a phenomenon in which the expert is an observer. It is often expressed explicitly, i.e. in a structured and articulated way, by those who hold it (“experts”). “Actor knowledge” is derived from actors’ experience of a phenomenon that they are (partly) responsible for. This knowledge is most often tacit (not articulated) or at least implicit (not yet articulated) (Raymond et al., 2010). Table 1 presents the list and number of local experts and actors who participated in the AL modeling and the type of participatory method used to elicit their knowledge.

Participants	Semi-directed interviews	Multi-actor mapping workshop	Farming system surveys
Farmers (27)			X
Presidents of water user associations, also active farmers (4)	X	X	
Representatives of farmers' unions (1)	X	X	
Agricultural extension officers: local-level French Chamber of Agriculture (1)		X	
Local cooperatives (2)	X		
Local state service in charge of issuing water withdrawal permits, water-use restrictions, and water releases (3)	X	X	
Fisheries federation of the local river (1)	X	X	

Table 1. Participants of the agricultural landscape modeling and types of interaction with researchers during the process. Numbers in italics indicate the number of people.

Informants did not only provide qualitative and spatially fuzzy information (e.g. drawings, round estimates); they also provided and quantified spatially explicit information produced by local organizations. From informants, we obtained geo-data layers from water user associations for hydraulic networks and areas dedicated to seed production.

1.2.2 Generic information: databases and information systems

We used generic information sources in all stages of our method: (1) to provide base information to develop the AL model and to identify missing information to reach a fine-scale CSSD, and (2) as a boundary object to facilitate elicitation of local knowledge. Table 2 presents the databases and information systems used. As detailed below (section 1.3), the French “Land Parcel Identification System” (LPIS) geographic database (Inan et al., 2010) is a cornerstone of our method. We present it concisely to later discuss its use and limitations.

Name	Information used	Source & Notes
- Land Parcel Identification System	<ul style="list-style-type: none"> - Spatial delineation of islets - Annual area per crop type (28 classes) per islet - Annual irrigated islets - Farm identifiers 	<ul style="list-style-type: none"> - Agency for services and payments - Confidential information, from CAP annual declarations - The spatial information is available only at the islet level - Irrigation information is available only from 2006-2009
Soil map	<ul style="list-style-type: none"> - Pedo-morphological units 	<ul style="list-style-type: none"> - Regional agriculture advisory services (CRAMP) - Performed for the whole NUTS II - Available at http://www.mp.chambagri.fr/Les-sols-du-Tarn-et-Garonne.html
Water agency database	<ul style="list-style-type: none"> - Annual withdrawal volumes (municipality level) 	<ul style="list-style-type: none"> - Local water agency - Compilation of mandatory declarations of water users - available from http://adour-garonne.eaufrance.fr/
Corine Land Cover	<ul style="list-style-type: none"> - Urban and orchard areas in 2006 	<ul style="list-style-type: none"> - Commission of the European Communities - Available from http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr
DB TOPO®	<ul style="list-style-type: none"> - Municipalities, main roads 	<ul style="list-style-type: none"> - French National Cartographic Institute (IGN) http://professionnels.ign.fr/bddvecteur
DB CARTHAGE®	<ul style="list-style-type: none"> - Main rivers, Hydrological units 	<ul style="list-style-type: none"> - French National Cartographic Institute (IGN)
DB ALTI®	<ul style="list-style-type: none"> - Digital Elevation Model 	<ul style="list-style-type: none"> - French National Cartographic Institute (IGN)
Database of water user associations	<ul style="list-style-type: none"> - Networks of pressurized hydraulic pipes for irrigation 	<ul style="list-style-type: none"> - Local water user associations - Made available by local state service

Table 2. Information systems and databases used in the study

The LPIS is based on farmers' yearly declarations to obtain Common Agricultural Policy subsidies. In France, LPIS data have been available for public research since 2006 in a randomized and anonymous version. It provides the geographic positions and shapes of farmers' field blocks (Sagris, 2013), hereafter called "islets". An islet corresponds to an area dedicated to agriculture managed by one farm unit, and is delineated by permanent physical elements of the landscape such as roads, hedges or forests (Figure 15). It may contain one or many contiguous agricultural fields. For each islet, LPIS provides a farm identifier and, yearly, the areas of all crops present, from 28 classes. We used the LPIS from 2006 to 2009, which was the most recent year available at the beginning of the study. In addition to the LPIS, we also used different geo-data layers, mainly consisting of (Table 2) an information system for soil developed by the local agricultural advisory service (LAAS, Chambre d'Agriculture Midi-Pyrénées), a digital elevation model (DEM) from the French National Cartographic Institute (BD ALTI®), a meteorological database from the French National Meteorological Institute (SAFRAN), the Corine Land Cover (CLC) database on land use, and the data on annual irrigation withdrawal from the Adour-Garonne Water Agency (SIE).

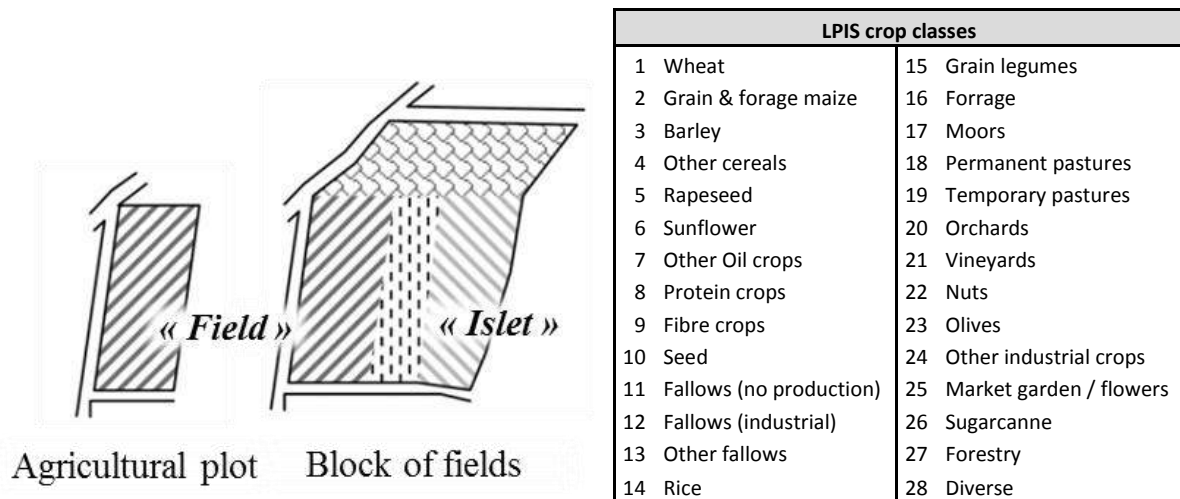


Figure 15. Key information provided by the French “Land Parcel Identification System” (LPIS) geographic database, and corresponding terminology used in this article. The LPIS spatially delineates islets (blocks of fields) and annual crop area(s) (ha) within each islet (annual area of fields) each year for all French farms receiving subsidies from the Common Agricultural Policy. Adapted from Inan et al. (2010).

1.2.3 MAELIA, a multi-agent and spatially explicit simulation platform

The multi-agent, spatially explicit simulation platform MAELIA (Therond et al., 2014) enabled us to evaluate whether our representation of the CSSD was able to retrace impacts of cropping/irrigation practices on water resources over the area at a daily time step. We consider MAELIA a generic source of information because the modeling infrastructure gathers scientific knowledge and was designed to adapt to any research project that analyzes the impact of land use practices on water resources.

Soil water content and crop development dynamics in the platform are simulated at the field level at a daily step using the AqYield crop-soil model, which considers daily management practices (Murgue et al., 2014b, Constantin et al., 2015.). Each field of the LPIS is geo-referenced and assigned a crop sequence, and each crop in the sequence is assigned a corresponding CMS, formalized as a set of decision rules. Fields are managed by virtual farmer agents: each day the agents check whether conditions of rules are respected and perform corresponding technical operations, field by field, according to their area and the operations’ labor requirements (time/ha). When multiple activities are activated on the same day, the agents prioritize them according to a pre-established (coded) hierarchy. MAELIA can produce outputs at various spatial scales, organizational levels and time steps depending on the user’s objectives.

1.3 CSSD method

We built our method around the concepts of Mixed Methods (Jick, 1979, also known as "triangulation") and Knowledge Engineering (Studer, Benjamins, & Fensel, 1998) to integrate generic and local information sources, and to elicit, question and formalize the local knowledge to make it applicable.

Mixed methods (Denzin, 1978 :291) is "the combination of methodologies in the study of the same phenomenon". The central idea is that looking at the same object from different angles better represents its reality. The term originated in the social sciences and is now used across other scientific disciplines (Buller, 2009), though found under various names ("mixed methods" in Debolini et al., 2013 and Yeager and Steiger, 2013, "hard/soft system approaches" in Pahl-Wostl, 2007, "disciplinary mix" in Meinke et al., 2009, "hybridation" in Lardon et al., 2012). Like Pahl-Wostl and Hare, 2004, we take mixed methods further by mixing methodological approaches and research material: generic and local information, and quantitative and qualitative models. Our approach is based on "mixed methods and information" and outcomes are called "hybrid knowledge" i.e. "the

new understandings which emerge through the integration of different types of information (such as local and scientific) and/or through multi-, inter-, or trans-disciplinary research”(Raymond et al., 2010).

Knowledge Engineering (Studer et al., 1998) is the process of eliciting people’s knowledge and formalizing it (Pahl-wostl et al., 2013a; in Geography: Shi et al., 2009 & Yeager and Steiger, 2013). The objective is to guide people to specify, and if possible, quantify and localize the descriptive variables they use. This process is comparable to “defuzzification” of stakeholder narratives in scenario making (Alcamo, 2008). We used Knowledge Engineering along with our CSSD method to collect and structure information from actors. Our elicitation approach to both identify and describe the CS was to ask informants to first describe the phenomena of interest (e.g. there is more rainfed maize in this area) and then clarify the underlying explanation (e.g. the soils are deeper and richer in clay than in the rest of the landscape).

We present our method in 6 phases (Figure 16) to facilitate understanding, as described in the following 6 sections. The phases encompass: Phase 1, articulating data exploration; Phase 2, analyzing LPIS data to assign crop sequences to each field of the AL; Phase 3, a multi-actor participatory mapping workshop to produce a spatial typology of CS and describe their allocation determinants; Phase 4, surveying 27 farms for detailed description of CMS of the CS in the typology; Phase 5, finalizing the CSSD (assigning crop sequence and CMS to each field) through complementary expert interviews. Delineation of the 2009 LPIS islets is used as the geographic foundation for modeling the AL. This results in an AL model in which each field is assigned a rotation type, a CMS (a set of decision rules and associated parameters), soil type, irrigation equipment, and farming system. The resulting data was used as an input in the MAELIA platform to assess the quality of our AL model (Phase 6).

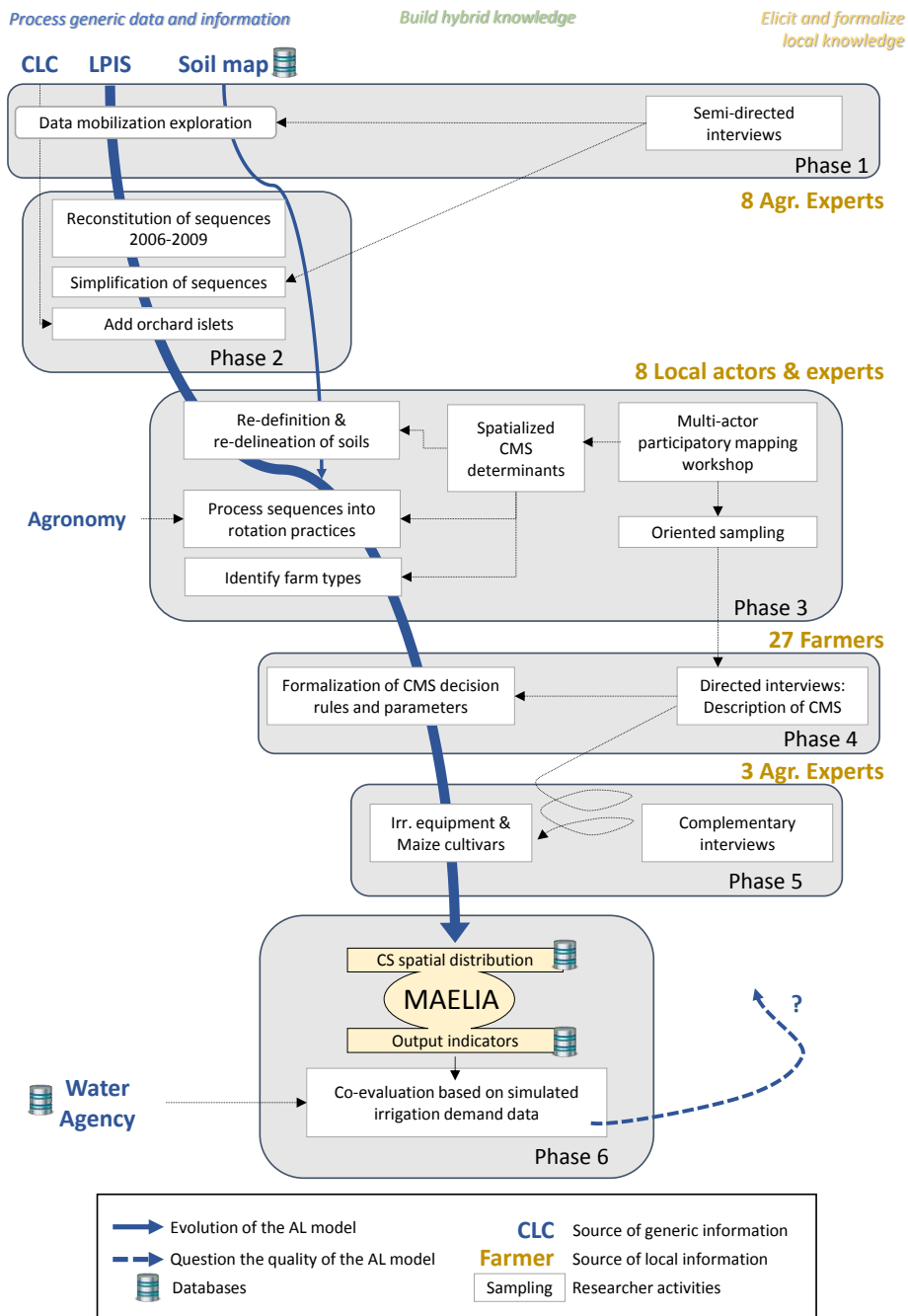


Figure 16. Summary of the methodological path followed to hybridize generic information and local knowledge in the Cropping System Spatial Distribution (CSSD) method (CLC: Corine Land Cover, LPIS: Land Parcel Identification System). After crucial exploration and data integration phases (Phase 1-2), a participatory mapping workshop produced a spatial typology of main cropping systems (CS), and detailed their determinants (mainly crop rotation practices and soil type (Phase 3). This typology identified a sample of 27 representative farms where a survey provided a detailed description of crop management strategies (CMS) for the different crops of the main CS identified in Phase 3. CMS were formalized through sets of nested decision rules (Phase 4). We also conducted complementary expert interviews to allocate additional CS determinants to all islets in the landscape (Phase 5). The CSSD method characterized each field of the agricultural landscape in terms of crop-cultivars/rotation type/soil type/irrigation equipment/farming system type and a corresponding set of parameterized decision rules representing CMS of the crops in the rotation type. This data was used as an input in the MAELIA platform to predict the irrigation demand of each irrigated field of the 2009 LPIS. Outputs were then aggregated at several spatiotemporal resolutions to allow agricultural experts to assess the quality of the agricultural landscape model (6).

1.3.1 Phase 1: Case study exploration: gathering data and meeting experts

We began the CSSD method by integrating generic spatial information from national databases and information systems (e.g. main rivers from DB CARTHAGE®, urban areas in CLC and main roads and municipalities from BD_TOPO®; Table 2) into a Geographic Information System (GIS). We also integrated raw LPIS datasets from 2006 to 2009. Concurrently, we conducted 8 semi-directive interviews with agricultural experts to qualitatively describe the spatial distribution of the main crops and to describe and locate the main factors explaining their existence. These interviews were held using “blank maps” (with only key landmarks such as main towns, roads and rivers) as “intermediary objects” so that experts could map out their perception of the issues investigated. We integrated more data and information into our GIS as we conducted the interviews because participants requested new generic information to position their information (mainly DEM in DB ALTI®, soil database, and orchard areas from CLC), and because we digitalized the spatial information they provided. We ran spatial queries on the 2009 LPIS to evaluate whether the explanatory factors stated by the experts (mainly areas dedicated to seed production, Water Users Associations (WUA) networks, and pedoclimatic zones) spatially matched that year’s crop distribution patterns.

Manipulating the databases, eliciting agricultural experts’ knowledge and combining the two allowed us to start shaping a mental representation of agricultural activities in the AL, which was indispensable for further interactions with local actors and experts. It also enabled us to clarify the available information and its worth, and therefore finalize our strategy on ways we could develop a hybrid representation of the AL.

1.3.2 Phase 2: Building spatial and temporal foundations for CS spatialization

This second phase of the CSSD was performed in the laboratory. It consisted of processing the four available years of the LPIS (2006-2009) to predict a crop sequence in all fields in the AL.

We used the latest LPIS year (2009) available to provide the geographic islet delineation in the AL model and then applied a generic “reconstitution of crop sequences” method to 2006 to 2009 LPISs, which we had previously developed (Leenhardt et al., 2012) and briefly present here. It is based on three main steps: (1) reconstitution of islets’ temporal continuity through using spatial concordance over the years (unknown, since each LPIS dataset is provided with new anonymous islets and farm identifiers every year), (2) identifying crop sequences by comparing crop coverage within the connected islets over the years, including area conservation or possible aggregation and disaggregation of fields within islets, and (3) allocating crop sequences to remaining non-filled surfaces by interpolating information about crop sequences in the surrounding fields of the farm and the AL. Application of this method resulted in many crop sequences (2,885), which mostly covered small to very small areas (64% of the sequences cover less than 4 ha of the AL). To manage this complexity, we applied simplifying algorithms based on the knowledge developed in Phase 1. Mainly, we (1) assimilated all sequences covering less than 10% of the islet area into the main sequence in the islet, (2) replaced LPIS class names with the corresponding locally observed crops (e.g. “OtherOilycrops” = “soybean”), and (3) assimilated unrepresentative classes (less than 5% of the irrigated landscape UAA) into similar ones by considering their irrigation management (e.g. market gardening was assimilated into orchards because it also requires early spring and late summer irrigation with full-cover equipment and high irrigation frequency). This simplification process drastically reduced the number of sequences necessary to cover the entire field (a total of 930). **Erreur ! Source du renvoi introuvable.**

Finally, agricultural experts indicated that certain parts of the AL was covered with orchards not represented in the LPIS because they are not subject to CAP subsidies; therefore, we used CLC information to integrate new islets with orchards in our database. We attributed these new orchard islets (approximately 700 ha) to 2 fictive farms of equal UUA to match the largest UAAs observed in the case study (approximately 300 ha). We thus

obtained an exhaustive geographic description of the agricultural areas and a four-year crop sequence for each arable field.

1.3.3 Phase 3: Consulting local experts to identify the main cropping systems

Given that no generic information about CMS was available, we developed a strategy in two phases (3 and 4) to collect existing local knowledge. The objective was to identify a sample of farms that implement CS representative of the AL (Phase 3) and then to perform individual surveys of these farms to elicit the CMS of the CS (Phase 4).

To identify representative CS and potential farm types to survey, we organized a multi-actor participatory mapping workshop, where we asked a heterogeneous group of local agricultural and water management actors and experts (Table 1) to list the most representative CS in the area and to describe the determinants of their distribution in the landscape. Using a "heterogeneous participatory modeling" approach, i.e. mixing actors from different stakeholder groups (Barreteau, Bots, & Daniell, 2010) along with brainstorming and "participatory mapping" methods (Abbot, Chambers, & Dunn, 1998; Chambers, 2006), we hoped to stimulate an understandable externalization of tacit knowledge and spatial representations (i.e. overcoming trans-disciplinary barriers), as well as to discursively develop a shared representation of the CSSD (i.e. which suits all participants and the research team).

The workshop started with a brainstorming-based discussion to (1) list the determinants of CMS distribution in the landscape and (2) list the most representative CMS (e.g. not irrigated, forage maize monocropping in deep clayey soils). Several iterations identified the representative CMS and their determinants: rotation type, soil type, and farm type (livestock vs. arable). The facilitator, a researcher, used visual aids to summarize and keep track of group discussions and ensure that all participants expressed their viewpoints. His role was to identify implicit ideas and help participants articulate them orally, in writing or by drawing. He did not provide information from the AL model built in Phase 2 because it could have corrupted participants' perceptions of the system and how they express them. After brainstorming, the group used a blank map to take part in Perception-Based Regional Mapping (PBRM, Bonin et al., 2001; Caron and Cheylan, 2005). Participants were asked to delineate areas considered to have homogeneous (i.e. identical sets) of CMS. Then, because soils were highlighted as the main determinants for CMS, the group mapped soil types with an approach comparable to the "mixed methods" presented and advocated by Yeager and Steiger (2013): the facilitator provided available spatial information layers (generic soil map and isolines from DEM – see section 1.2) and the participants refined their spatial distribution and agronomic characteristics.

The outputs of the participatory workshop were integrated into the GIS to refine the AL model. We first updated the soil layers and then developed algorithms to process LPIS-based data. The algorithms characterize each field with elicited determinants of CMS (e.g. soil type). Rotation practices were determined from the LPIS crop sequence based on the knowledge elicited in the workshop. Farm types were distinguished according to the forage portion of their UAA in 2009.

1.3.4 Phase 4: Describing CS in detail: directed interviews with farmers

To describe the decision rules for all CMS types identified in Phase 3, we made a sample of 27 farms covering all combinations of rotation – soil – farm types (ensuring at least 2 replicates of each CMS type). We conducted directed interviews with each farmer to elicit their strategies to implement CMS. We asked farmers first to list the main CS, and then to detail them following two steps: (1) writing and drawing on a calendar the description of a "normal" CMS for all species/earliness potentially cropped in each CS, i.e. when climatic conditions are average and have no external constraints; (2) describing the cognitive resources (indicators and thresholds) he or she manipulates to implement a technical operation (Dury, Garcia, Reynaud, & Therond, 2010; Hollnagel, 2003; Studer et al., 1998), e.g. the amount of rainfall in recent days. A cognitive-task-analysis approach was used

for this second step (Schraagen, Chipman, & Shalin, 2000). Our model of the AL during this phase evolved along with the farm survey, which prompted us to continually revise our CS and determinant lists, and consequently to upgrade the algorithms produced in Phase 3.

For each farm surveyed and each CMS in all the CS, we formalized farmers' strategies into UML (Unified Modeling Language) activity diagrams. They provide a standardized representation the activities, the decision rules that trigger them and the elements that support the choices and manage iteration and timing of the activities (Figure 17). UML activity diagrams were used as hypotheses to build generic models of CMS for each crop of each CS type through an inductive and iterative integration. They were formalized using a set of nested decision rules with the generic form: "IF INDICATOR – OPERATOR – THRESHOLDS THEN ACTION (ELSE ACTION)".

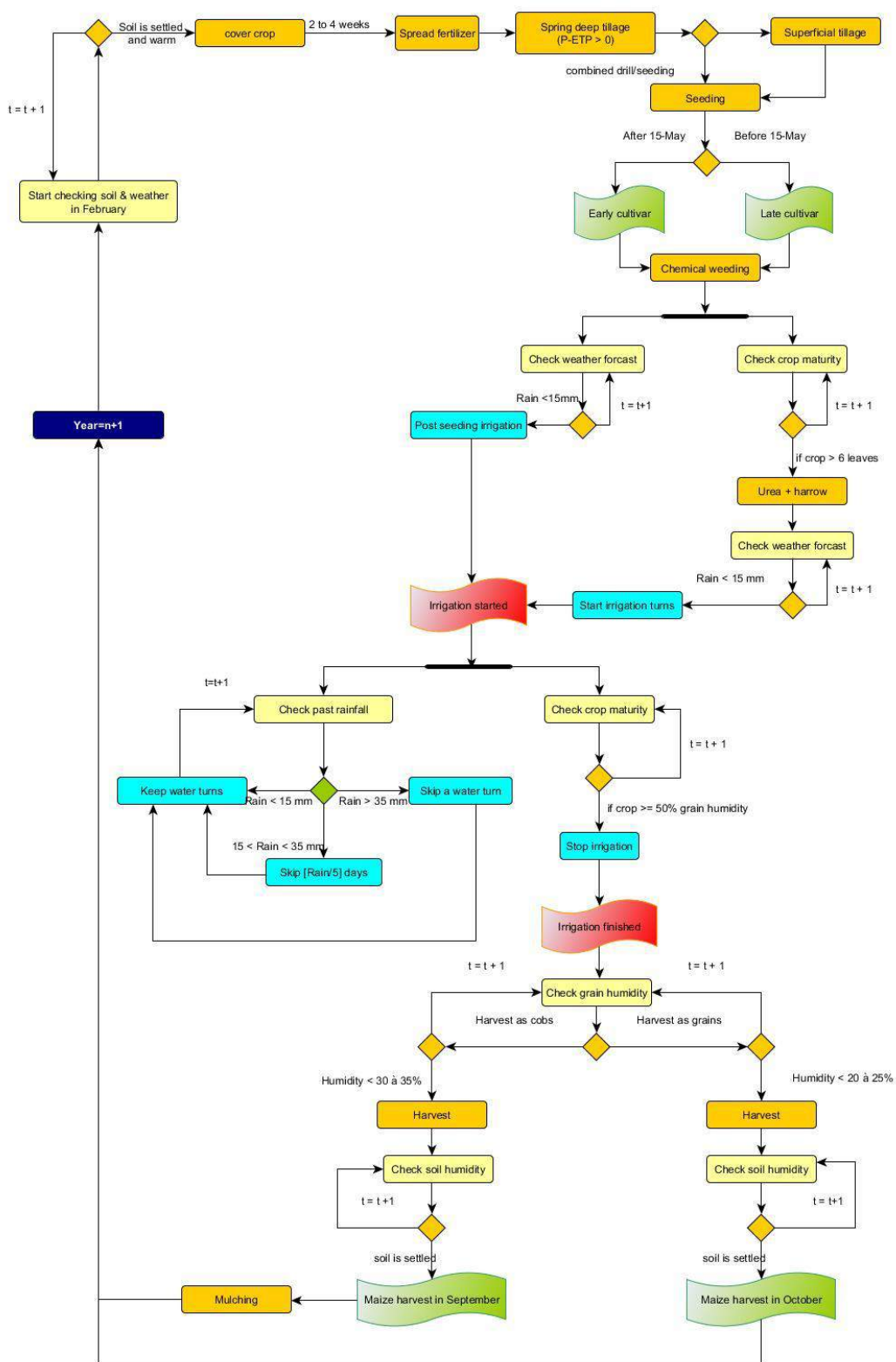


Figure 17. UML activity diagram of a crop management strategy for maize monocropping formalized from outputs of a directed interview with a farmer (Phase 4).

1.3.5 Phase 5: Complementary interviews for the allocation of irrigation equipment and maize cultivar earliness

Farm surveys highlighted key field/CS characteristics that farmers consider when defining their CMS but which were not revealed during the participatory workshop (irrigation equipment and maize cultivars, see in results). We considered them as CMS determinants and consulted agricultural experts during dedicated directed interviews to allocate them to all irrigated islets of the AL.

We elicited proxies and thresholds from expert responses, then used to build and parameterize an allocation algorithm. We showed the simulation results to the experts to verify whether the model matched their representation. For the allocation of irrigation equipment, we used rotation and soil type, islet size, farm size and importance of irrigation on the farm. For distributing maize cultivars, we used rotation and soil types, with a limit of three different types per farm.

1.3.6 Phase 6: Using MAELIA to co-evaluate the quality of the AL model

In the last phase we evaluated the ability of the CSSD to distinguish irrigation practices and resulting irrigation demand within and across the entire landscape. We ran the MAELIA platform over the 2003-2009 period and used the CSSD as input i.e. effect of a rotation type and corresponding CMSs on each field of the 2009 LPIS.

We developed two approaches to assess model predictions. First, a quantitative approach, in which we compared simulated annual withdrawals at the landscape level to corresponding data provided by the water agency. Second, as promoted by Bergez et al. (2010) for assessing integrated modeling tools, we chose to compare results to local expertise in a qualitative assessment. This co-evaluation was based on (1) annual volumes withdrawn, (2) timing of simulated irrigation per CMS, (3) intra-annual daily irrigation demand. To facilitate this co-evaluation, we developed a tool that enables experts to visualize the simulated irrigation demand dynamics for their choice of year, location, administrative level and/or CMS. We assembled local experts in a small-group workshop (one local expert extension officer in irrigation and two officers from the state water management services) and asked them to assess the quality of these predictions. To assess the timing of irrigation, we relied only on agricultural expert knowledge. We anticipated difficulties in evaluating daily irrigation demand since no measurements are available and the phenomena simulated are not directly observable.

2 Results

2.1 The AL model

The AL model progressively evolved from Phase 1 to Phase 5. During data exploration (Phase 1), we produced several maps and tables using the raw LPIS data. For example, we displayed each crop area per municipality to understand the main patterns of crop distribution in the case study. The map was not spatially explicit nor did it provide any temporal insights. The following phases, involving expert and actor knowledge, produced a more informative AL model.

Phase 3 provided key information for building the AL model. In the participatory workshop, we built a general picture of CSSD, identified the main CMS (investigated in Phase 4), and collected a list of CMS determinants and a description of their spatial distribution. The CMS determinants identified were crop rotation type, farm type, soil type, irrigation equipment and, for maize CMS, cultivar type. The workshop discussions identified 13 rotation types that could be distributed in all fields based on the estimated sequences. Participants decided that farms with more than 10% forage or annual grassland area would produce cattle and thus crop 30-100% of their annual maize area as forage maize and so our model points to forage maize CMS. The hybridization of generic and local information identified 11 soil types (Figure 18). Similar to the work of Shi et al. (2009), participants described space both geographically (direct delineation) and parametrically (rule-based localization). For example, for the rule-based localization, they identified patches of “lighter” soils in heavy-clay soil units, which prompted us to locate them using the maize monocropping LPIS islets and lower their clay content by 10%. Local knowledge thus generated a more precise soil map from the original generic one: soil unit delineations were improved and patches of less clayey soils were included in clayey soil units.

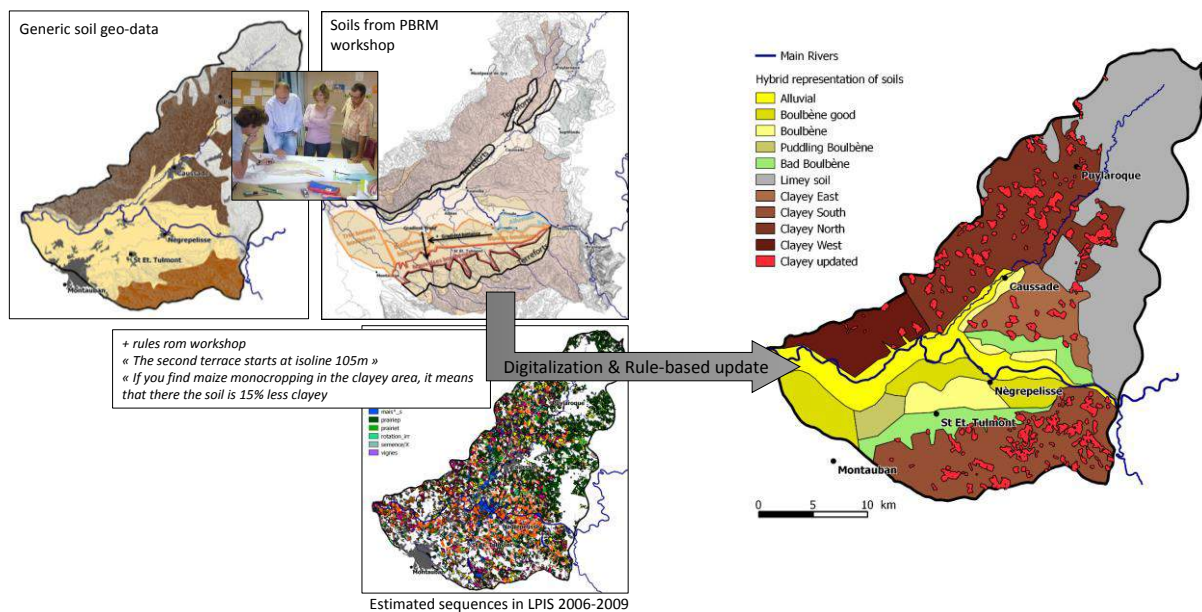


Figure 18: Main outcomes of participatory mapping workshop for soils: participants use geographic and parametric descriptions to refine the generic soil map. Formalization of their knowledge enabled developing a refined formal soil map. The output map shows the hybrid information created from integrating all data sources.

All intermediary results were crucial, not only for the continuity of AL modeling (i.e. sampling of farms investigated in Phase 4) but also for the formalization of a qualitative, yet spatially explicit, representation of the CS spatial distribution. Participants developed a map subdividing the AL into seven zones, each with a homogeneous set of predominant CMS determinants (Figure 19). The map is associated with a list of the main CS and their main spatial-allocation determinants: soil, rotation and farm types.

CS	Irrigated	Rotation type	Soil type	Farm type
Orch_{int} - water intensive Orchard	Permanently	Orchard	Alluvial soils	Large UAA, only orchard, companies
Orch_{ext} -water extensive Orchard	Permanently	Orchard	Hillslopes clayey	Small orchard areas, mixed cropping
M* - monocropping maize	Permanently	Maize only	Alluvial soils	Large islets, connected to WUA, no livestock production
M*_{rg} - monocropping maize with Ray Grass	Permanently	Maize only	Alluvial soils	Large islets, connected to WUA, livestock production
M*_{sem} - monocropping seed maize	Permanently	Seed maize only	Alluvial soils	Secured water access
M_{rot} - maize with cereals and oil crops	Most of the time	Maize / cereals / oil (/ others)	Hillslopes clayey	Large UAA, Secured water access (livestock production)
M_{semrot} - seed maize with cereals and oil crops	Most of the time	Seed maize / cereals / oil	Hillslopes clayey	Secured water access, no access to seed production areas
Pt*_{irr} - Irrigated forrage grassland	Most of the time	Temporary Grassland / cereals	Alluvial soils	Livestock production
Cer_{int} - intensive cereals	Rarely	Rapeseed / cereals / sunflower	Alluvial soils and Hillslopes clayey	Large UAA, companies
Cer_{ext} - extensive cereals	Dry	Cereals / sunflower (/others)	Alluvial soils	Large UAA, mixed cropping (livestock production)
Cer_{ext} no till - extensive cereals, no deep tillage	Dry	Cereals / sunflower (/others)	Hillslopes clayey	Large UAA, mixed cropping (livestock production)
Pt* - permanent grassland	Dry	Permanent Grassland	Thin, poor	Livestock production, mostly grassland areas

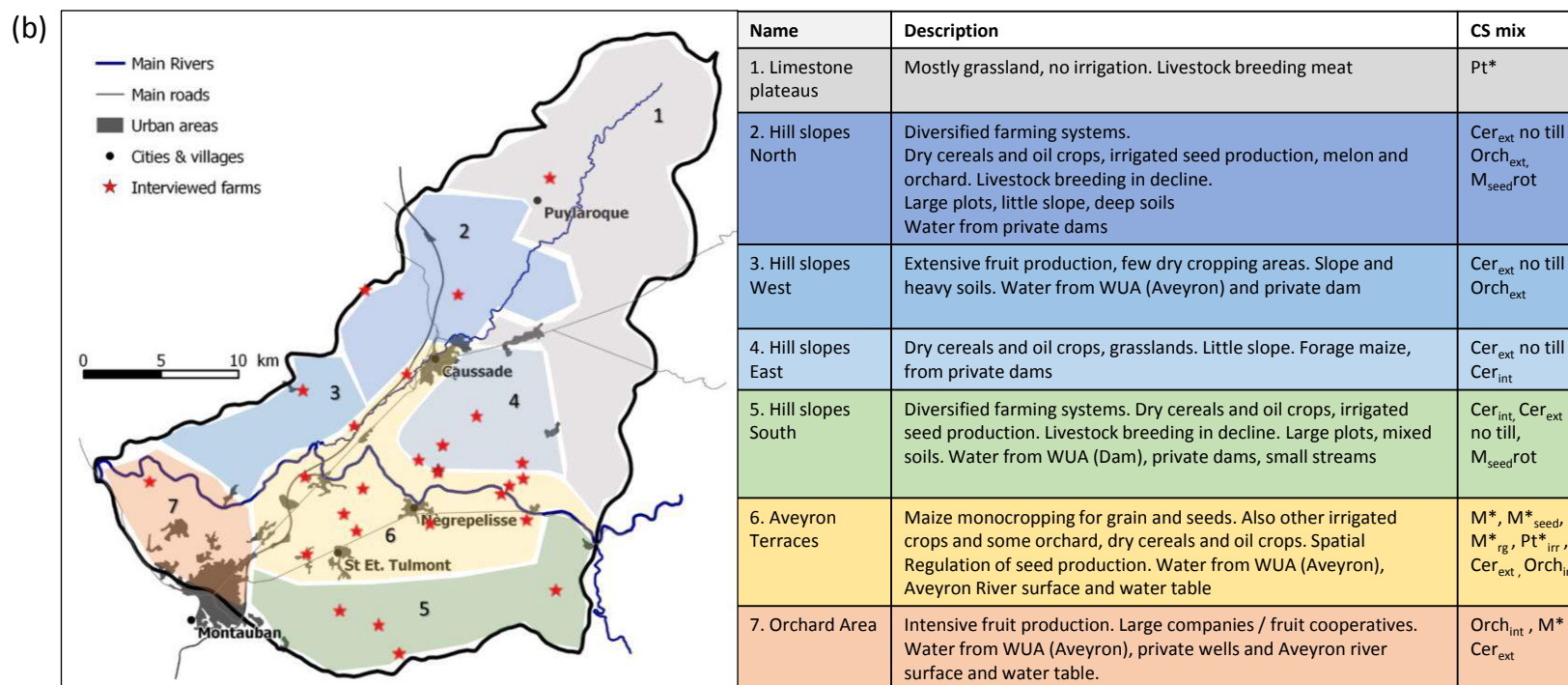


Figure 19. Main outcomes of participatory mapping workshop concerning cropping systems (Phase 3): (a) the main cropping systems (CS) and their main determinants, (b) Formalized map of areas considered as homogeneous in terms of main CS and their description.

During Phase 4 farm surveys, we identified the cognitive resources that farmers used to make decisions about field operations: weather conditions (past and upcoming rainfall), soil conditions (structure and water content), crop-development stage (phenology), biophysical environment (water resource availability), labor availability and the priority of operations. Based on these indicators, we developed a generic decision-rule framework for all CMS concerning (1) tillage of various intensities and depths, (2) sowing, (3) irrigation, and (4) harvest. They were implemented in the MAELIA platform to simulate daily farmer CMS in each field (Figure 20). Interviews also enabled us to identify two extra CMS determinants: irrigation equipment determines the irrigation strategy and the choice of a particular earliness determines the sowing and harvesting periods.

Phase 5 allocated five types of irrigation equipment to all irrigated islets in the AL: pivot, large and small mobile sprinklers, full-cover sprinklers and drip irrigation. The equipment determines the irrigation frequency and irrigation amount (mm) in the same CMS. We also allocated seven cultivar types to maize and differentiated maize flowering earliness from very early to very late, which had a difference of 300 degree days (°C) to reach grain maturity.

Ultimately, we obtained an AL model with approximately 1,150 farms composed of 12,000 geo-referenced islets, in which each of the 18,000 fields had a CS (Figure 20). As CMS were described with sets of decision rules (and corresponding parameterization), and the AL model simulated technical operations in each field according to inter- and intra-annual climate variability. A total of 140 CMS (i.e. sets of parameterized rules) were formalized for the entire AL. Also, using the observed crop in 2009 as a reference crop, the estimated sequence simulated the occurrence of crops over the years.

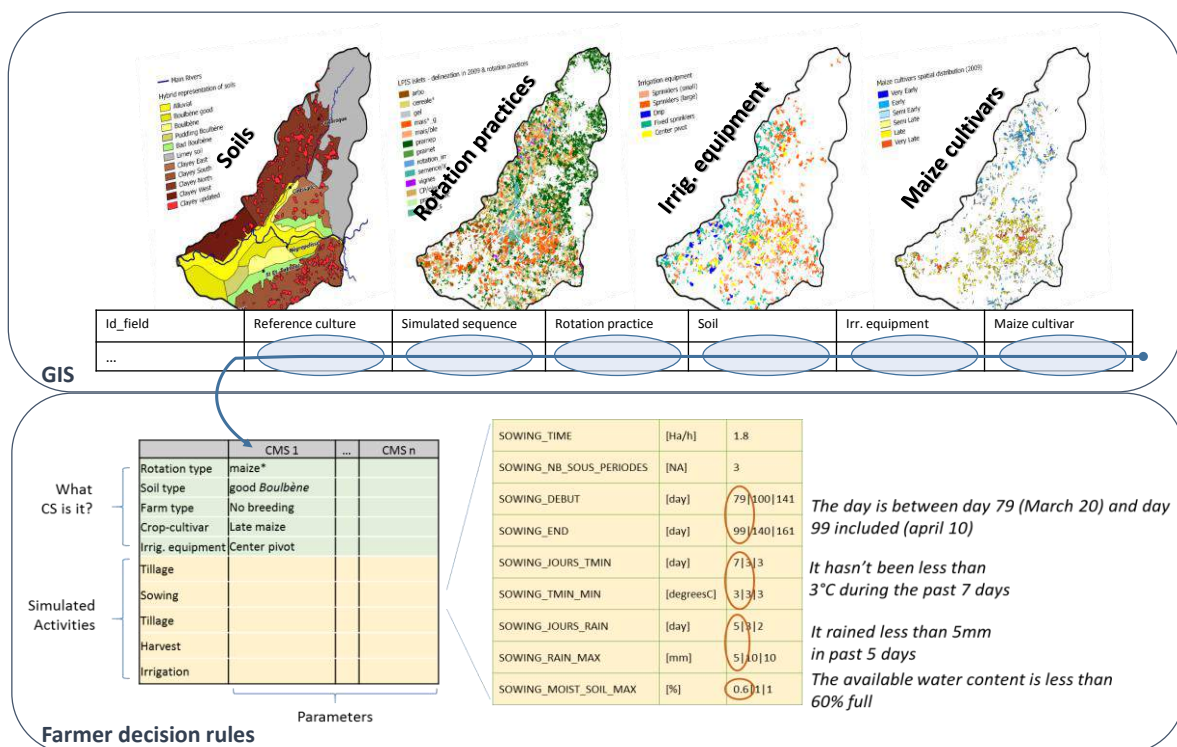


Figure 20. Summary view of the formal representation of cropping system spatial distribution. Each field of the AL is defined by a rotation practice, soil type, irrigation equipment if irrigated and a maize cultivar type if cropped with maize. The combination of these elements defines the CS (arrow). The cropping system is described by the parameterization of decision rules. The table shows an example of simulating a crop management strategy in a maize monocropping field and focuses on the sowing activity. Explanation is provided for time window no. 1.

2.2 Co-evaluation of the AL model using the MAELIA platform

2.2.1 Annual balance and inter-annual variability at the watershed level

Simulating an AL for an 8-year period, the model relates patterns of annual water withdrawal volumes and inter-annual differences in withdrawal relatively well. Compared to data from the state water agency, the model under predicts annual withdrawal by a mean of 10%, with a maximum of 23% in 2003 (Figure 21).

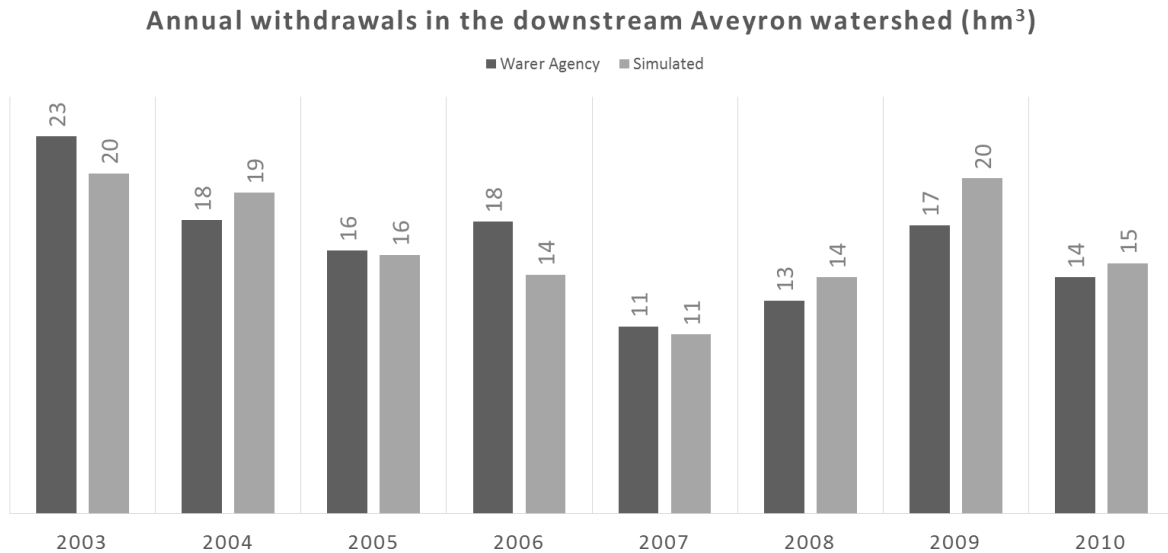


Figure 21. Observed annual withdrawals (m³) from the local water agency database (dark gray) vs. those predicted by MAELIA (light gray) in the case study from 2003-2010.

This is also observed when analyzing results at the scale of reference hydrological units, i.e. the smallest watershed level defined by local state services in charge of water management. The under-prediction in 2003, the year of the greatest drought for decades, shows one weakness of the model: the crop-management decision rules developed to simulate irrigation do not predict irrigation amounts well for extreme droughts. The key to exploring and solving this under-prediction is to adapt farmer CMS to account for early edaphic drought and initiate irrigation in the weeks following sowing (March-April). Looking at predicted annual irrigation and inter-annual variability at the sub-watershed level, experts unanimously agreed that the predictions were satisfactory to assess of alternative AL potential in tackling quantitative water management issues. They even stated that the predictions were often as accurate as the data from state water agency, which itself considers its data accurate to within 10%. Because MAELIA simulates agricultural activities at fine-scale spatial and temporal resolutions, results can be displayed at any level over these resolutions (e.g. individual farms, groups of farms, zones with particular water management issues).

2.2.2 Irrigation practices at the field level

Table 3 summarizes simulated average irrigation practices for grain maize monocropping systems in alluvial soils. The difference between first and last irrigation dates among years shows that the decision rules representing CMS predict the effect of annual drought intensity and precocity, as well as plant-development dynamics, on these technical operations. The simulated frequency and total amounts of irrigation show that the decision rules also predict farmer adaptation to seasonal precipitation. These results are consistent with data about irrigation practices collected during the farm interviews in Phase 4. Experts were satisfied with the variability of first and last irrigation dates, irrigation frequency and seasonal amounts, the different CMS, irrigation equipment, and soil types.

Table 3. Summary of simulated irrigation practices for grain maize in alluvial soils and in maize monocropping systems (annual average). Irrigation frequency equals the number of irrigation passages per field.

	Average date of first irrigation	Average date of last irrigation	Irrigation frequency (days)	Average amount (mm)
2003	23-May	15-Sep	11	292
2004	4-Jun	1-Oct	10	287
2005	3-Jun	4-Oct	11	305
2006	25-May	2-Sep	9	263
2007	23-Jun	21-Sep	8	255

2.2.3 Intra-seasonal dynamics of the irrigation demand

Figure 22a shows simulated dynamics of irrigation demand for the 2004 low-flow season (all CMS at the landscape level) and an example of an indicator used in CMS irrigation decision rules for regulating irrigation in maize monocropping systems in alluvial soil: 5-day cumulative rainfall. The expert group validated the overall shape of the predicted withdrawal flow curve in relation to rainfall over the season; however, they highlighted the issue of repetitive peaks. Since they did not feel comfortable assessing the prediction's absolute value at the landscape level, we reprocessed the results and displayed what they agreed could be a basis for discussing the absolute value: the total demand of fields irrigated only from the Aveyron River (Figure 22b). The experts again validated the overall dynamics but decided that maximum demand was under-predicted, even though they had validated the predicted annual volumes and timing of irrigation. We displayed the results at different spatiotemporal levels to discern where they thought the problem lay. Thus began an iterative comparison of dynamic graphs with annual water balance histograms for several years and scales, calling upon additional expertise (e.g. the pumping potential of all WUA). The group concluded that even though irrigation demand was under-predicted, their perception could have been biased because they do not have direct access to these data in the field and may have exaggerated irrigation demand because of the crisis situation that year.

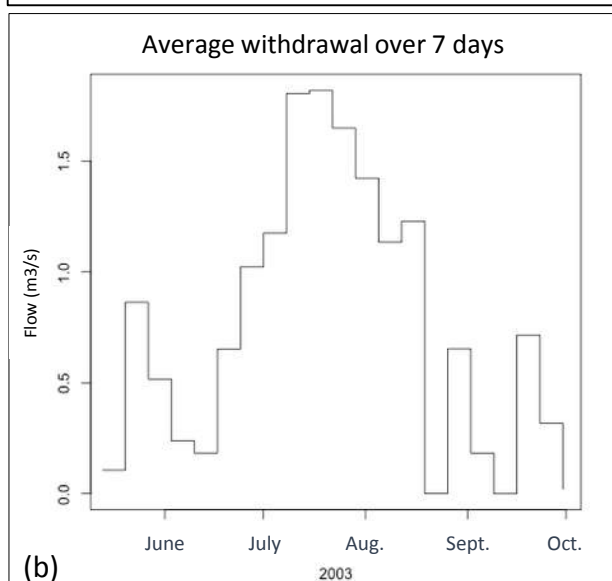
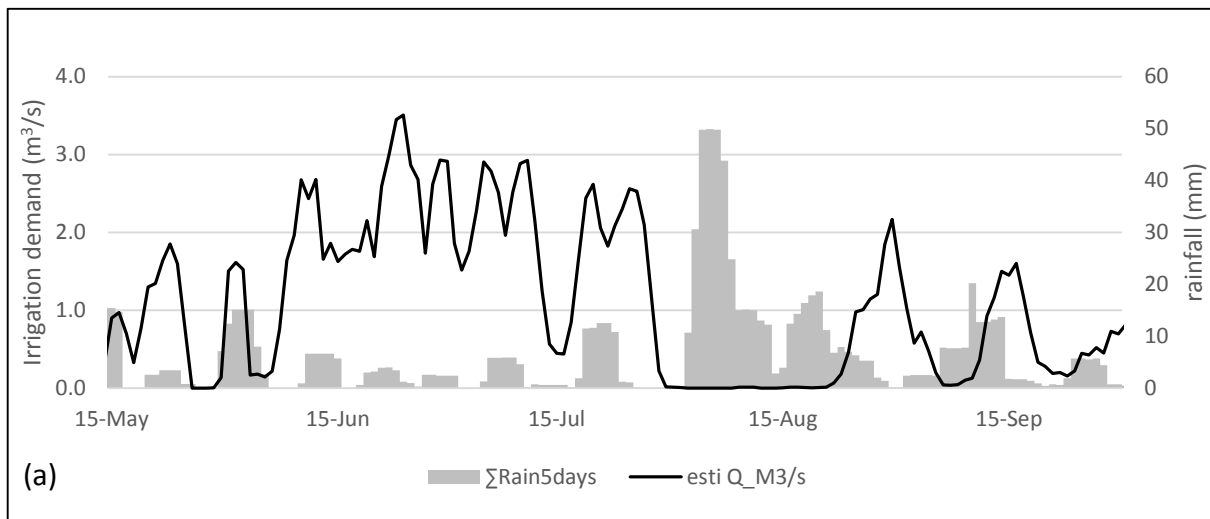


Figure 22: Predicted withdrawal demand dynamics [m³/s] (a) in 2004, for all irrigated fields (solid line) and 5-day cumulative rainfall (gray bars); (b) in 2003, for all soil types for fields connected to the Aveyron River.

Another point of discussion was the many peaks in predicted irrigation demand (Figure 22a). The participants emphasized that the beginning of irrigation simulated was probably too synchronized among farms. This alerted us that in the MAELIA platform for a given year, technical operations in fields with the same crop, CMS and soil type are simulated synchronously. Hence, farmers might start irrigating on the same day. To better represent reality, we must adapt the MAELIA platform so that it randomly assigns farmers a reactivity factor so that technical operations, especially irrigation, are spread out.

3 Discussion: a step closer to fine-scale modeling of the agricultural landscape

3.1 Managing the trade-off between landscape extent and representation of cropping systems

Previous studies attempted to model the AL by focusing mainly on CSSD (examples in Leenhardt et al. (2012a)). For example, similar to our study, Clavel et al. (2011) present a “procedure for the spatial allocation of cropping systems” in a large landscape to address quantitative water management. They developed their method from a much larger case study (8,000 km²) but represented CS more simply than we did. They focused on maize management, did not consider crop sequences and tillage practices, and represented a smaller set of CMS. In general, because generic data for detailing crop sequences and CMS are limited, a compromise must be found between the extent of the case study and the detail in which CS are represented. When the extent exceeds tens of square kilometers, it becomes impractical to survey each farm in the AL, and CS representation is often overly simplified. Our method offers a way to manage this issue: structured hybridization of generic and local information based mainly on databases and local knowledge. Also, the actors from the AL involved in our method endorse an active role. They are responsible for producing some of the data and information required (e.g. the determinants) and are not consulted only to identify or validate them. In Clavel et al. (2011), as in many studies dealing with landscape modeling beyond individual surveys, local actors are consulted to help researchers understand generic information, in other words, to find sense in it, but not really to produce or refine it.

Two specific approaches in our method make the resulting AL model more operational. Being exhaustive, it can precisely analyze site-specific CS, and because it is based on continuous science-actor collaboration, the model and its predictions are easily used and accepted as intermediary objects for further collaboration (e.g. in collaborative design of sustainable futures, see (Murgue et al., 2015).

The main limiting factor of our method when building a fine-scale model of a large AL (e.g. several thousand km²) would be the possibility to collect local knowledge. We believe that an initial participatory workshop would be needed to subdivide the AL into smaller sub-areas, each of which would be considered homogeneous regarding the issues under investigation. The method presented in the paper could then be implemented in each sub-area in parallel. The main challenge in this case would be to homogenize the representations (models, thresholds) of the sub-areas, so that they are generic enough to then fit within one modeling infrastructure (e.g. MAELIA).

3.2 The challenge of modeling crop management strategies at the AL level

The CS concept was initially developed for farm-level agronomic studies. A clear challenge exists for its use at the landscape level because of the potential diversity of farmers’ strategies and tactics. Using CS at a regional scale means that agronomists must group identically managed fields not at the farm level, but at the landscape level. Because of the CS diversity found in any AL, it is necessary to classify farmer practices. Yet, because we aimed to address site-specific water management issues, we intended to avoid inappropriate generalizations that would bias the analysis. AL modelers may face a trade-off between generalization and specificity, i.e. between accounting for the diversity of CS and simplifying them (Bürgi, Hersperger, & Schneeberger, 2004; Maton, Leenhardt, Goulard, & Bergez, 2005).

As in all these studies, our approach was based on identifying and describing only those cropping practices that influence the phenomenon studied. For the phenomenon we studied, representing only a few types of CS and associated CMS with fixed dates and technical operations was not suitable. The greatest challenge was to both capture the key determinants of CS diversity and to model crop sequences and dynamics of CMS (through sets of decision rules). This requires an intense modeling process that is both time and resource consuming. However, building such a detailed model of the AL offers a large range of possible uses for water management issues. It

can be used as input to a fine-scale spatial and temporal multi-agent simulation platform such as MAELIA, which enables an intra-seasonal and inter-annual, multi-criteria assessment of the current situation. Such fine-scale representations are useful for designing alternative AL and testing their potential to reduce the risk of a quantitative water management crises. Whether scientists or local actors, designers could use many AL elements to propose local and specific changes (Murgue et al., 2015).

Even with such a time-consuming approach, the representation we developed remains partial. The question a modeler must ask (Grimm & Railsback, 2012): Is the representation acceptable for addressing the issues I wish to address? In other words, can it reproduce the problematic phenomena? This is the reason we validated our approach with irrigation withdrawal dynamics.

3.3 Challenges in mixing information sources

Generic information is abundant, often considered to have a high degree of objectivity, and is increasingly accessible. However, *accessible* does not mean easy to use. Generic information must usually be adapted to become operational in a specific case study. Notably, generic information sources embed useless information (i.e. not suitable, not functional, incomplete) and are heterogeneous (i.e. concern different sets of objects/concepts, use different conceptual references, and spatial and time resolutions and extents). Therefore, when used for a specific purpose, they should be restructured, adapted, harmonized and, when dealing with a complex system such as AL, usually supplemented.

Local information, although rich in insight, up-to-date and operational, is often qualitative or spatially equivocal. It is also subject to controversy and inconstancy depending on the actors' interests and viewpoints (Raymond et al., 2010)(Raymond et al., 2010)(Raymond et al., 2010)(Raymond et al., 2010)(Raymond et al., 2010)(Raymond et al., 2010)(Raymond et al., 2010)(Raymond et al., 2010)(Raymond et al., 2010). Using it is challenging because it is (1) spread between actors and is unique to their experience of part of the system; (2) reductive, since actors articulate it according to their field of activity and management strategies; (3) subjective, since actors perceive the system and express their own issues and interests; and (4) often tacit and never expressed within the modeling framework. Even with these constraints, local information is crucial because it is grounded in local interests and thus often provides genuine detail (e.g. recent, hidden, unmeasurable). To overcome these constraints, we emphasize the importance of choosing key informants from diverse activities (challenges 1 and 2 above), using all available generic information to consider informants' perspectives (challenge 3) and implement knowledge-engineering approaches to ensure that all available information has been expressed (challenge 4). Some authors, such as Dunn (2007), refer to the development of GIS and question the possible representation of local knowledge in information systems that, by nature, favor quantitative and spatially-defined information. We demonstrate that knowledge engineering (mainly collective participatory mapping and task analysis) makes it possible to elicit local knowledge and formalize it into quantified, spatially explicit representations (usable in simulation modeling). This was made possible by using generic information at the same time as knowledge elicitation, since it can be used as a support to question and then integrate local information. In addition, frequently acknowledging generic and local information ensures the quality of results and their local acceptance. We see the outputs of our AL modeling method as an operational representation, which is shared by informants since the information sources and their enrichment were often discussed with them, and the outputs were compared to both available data and local expertise.

3.4 On knowledge engineering

During the participatory workshop, participants asked if we could provide information from databases to help them reflect on CS spatial distribution. The facilitator must find a compromise in these situations: not providing external information stimulates expression of people's knowledge; however, providing available information provides a useful basis for elaboration. The facilitator must make sure that all tacit knowledge has been revealed before providing extra information because of the risk of altering people's perceptions. We provided information

for the soil mapping exercise because it was clear that participants needed it as a foundation to explain soils with spatial precision.

Conclusion

CS spatialization is often necessary to move beyond assessment of annual and global water balance in AL studies. Using mixed methods, information and knowledge engineering, we produced a fine-scale model of AL, including a near-field-level description of cropping systems' spatial distribution. The mixed methods allowed us to make more efficient use of generic information, especially the LPIS database. Crop management strategies in our AL model are represented through sets of nested decision rules that, once implemented in a simulation platform such as MAELIA, simulate the dynamics of technical operations. This model can analyze the dynamics of irrigation demand at all organizational levels and in all sub-areas of the landscape, as well as reproduce farmer practices and their spatial variability. After analyzing intra-seasonal dynamics of irrigation demand over an 8-year period with local actors and experts, we conclude that it should be improved to better predict the effects of extreme drought conditions (e.g. of 2003). The model is currently being applied as a co-design method to provide a basis to collaboratively design alternative CSSD and predict effects on water-deficit dynamics and crop yields.

Etape 2:

Towards integrated water and agricultural land management. Participatory design of agricultural landscapes

Clément Murgue*, Olivier Therond, Delphine Leenhardt

Agronomie, INRA UMR AGIR, 24 chemin de Borderouge, B.P. 52627, F-31326 Castanet-Tolosan, France

*corresponding author: clement.murgue@toulouse.inra.fr, Tel.: +33.5.61.28.50.43

Highlights

- We present a methodology for the collaborative design of alternative agricultural landscapes.
- This methodology allows for accompaniment of stakeholders in the specification of acceptable changes to deal with water-management issues.
- Stakeholders designed precisely-described changes in cropping systems, formalized in a spatially explicit model.
- Designing in separate groups increased the curiosity and desire of opposing parties to work together.

Keywords

Irrigated agriculture, quantitative water management, landscape design, local knowledge

Abstract

One of the great challenges of developing sustainable water management is to integrate water and land use issues, and to favor stakeholders' involvement in the process of designing a solution to the specific issues of water basins. This study aims to help reach these objectives: we present the outcomes of a methodology that aims to design, with stakeholders of a watershed facing quantitative water management issues, alternative agricultural landscapes that they each consider as potential solutions. Our design approach combines (1) facilitation of participatory workshops for designing changes in cropping systems and their spatial distributions at the landscape level with (2) formalization of these alternatives in a GIS. The formalized alternatives provide precise information about fields, farms and areas concerned by the designed changes. We present two sample results of this methodology implemented in a 840 km² irrigated landscape located in a water-deficient watershed in southwestern France. We discuss how our design approach may be useful for a wider design-and-assessment methodology involving researchers and stakeholders with conflicting interests. We show that our co-design approach provides fertile ground for the emergence of salient, credible and legitimate change options.

Abbreviations

D&A: Design-and-Assessment

WAE: Water and Aquatic Environments

GIS: Geographic Information System

CS: Cropping System

UAA: Utilized Agricultural Area

Introduction

In Europe, even though water resources have a relatively high natural availability and storage capacities are well-developed, shortages of and conflicts over the resource are common (EEA, 2012). These situations sometimes emerge when regulatory measures are set up to promote environmentally sustainable management of natural resources (e.g. Water Framework Directive in EC, 2000). By setting new restrictive standards for resource use, they call into question the sustainability of human activities that until then had been supported, such as irrigated agriculture.

A recent report by EEA (2012) highlights two challenges for water management: (1) accounting for land use management that influence water flows in hydrosystems and (2) encouraging better communication between policy makers and practitioners to consider a more integrated way to govern land and water resources. In their analysis, Narcy and Mermet (2003) and Gober et al. (2013) also emphasize the need to coordinate water resource and land use management, and the difficulty in getting stakeholders of these two groups to communicate.

“Landscape agronomy” (Benoît et al., 2012; Caron, 2005) provides a suitable scientific perspective to deal with these challenges. This field of agricultural sciences analyzes the structure and dynamics of agricultural landscapes (AL) to assist stakeholders who wish to deal with their specific natural resource management problem, for example to evaluate the sustainability of an AL (e.g. Debolini et al., 2013) or to design alternative ones (this study). The AL, defined as the area under the influence of agricultural activities, is characterized by its land cover/use types, both in composition (nature and number) and spatial configuration (pattern). Depending on the topic of interest, landscape agronomists may focus on one or both dimensions (composition and configuration) and different land cover/use characteristics of the AL. When dealing with water management issues, they often need to analyze the spatial distribution of cropping systems (CS) (Leenhardt et al. 2010). More specifically, to address low-flow issues in irrigated areas, they may need to analyze relationships between the spatio-temporal distribution of farming practices (e.g. sowing dates and irrigation) and the hydrology of water resources at stake (Therond et al., 2014).

Spatially explicit assessment and modeling of interactions between agricultural land use and natural resources have increased since the 2000s (Debolini et al., 2013; Ewert et al., 2009; OECD, 2009; van Berkel and Verburg, 2011). These modeling approaches are habitually developed in two key steps: (1) collection and integration of available generic information about large areas (e.g. Janssen et al., 2009), followed by (2) understanding and representing, via computer models, interactions between agricultural land use and natural resources. Computer assistance is used to assess, diagnose, or optimize systems (e.g. Castellazzi et al., 2010), or to simulate effects of specific changes (e.g. Martin et al., 2012; Salmon-Monviola et al., 2012). In the water-management domain, many studies aim to estimate the seasonal water requirements of crops at continental and regional scales (Wriedt et al., 2009). Some studies performed at smaller scales (local to regional) have also focused on representing biophysical processes (Darshana, Pandey, Ostrowski, & Pandey, 2012; Pérez, Abrahão, Causapé, Cirpka, & Bürger,

2011; Sadeghi, Jalili, & Nikkami, 2009). Few approaches integrate the spatial variability of farmer practices; Hanafi et al. (2012) represent variability in irrigation practices, while Maton et al. (2005) integrate agricultural practices that determine the irrigation demand and, in turn, withdrawals.

The use of these modeling approaches in decision-making processes and in promoting communication between viewpoints raises methodological issues (Olsson and Andersson, 2007): (1) models are laden with choices and thus depend on assumptions and priorities of modelers, and (2) several factors influence the ability and willingness of stakeholders to criticize or accept results of the modeling exercise. We believe that when a model is built by researchers to answer questions they developed themselves, the thematic conclusions drawn from these models are usually not accepted, or are at least questioned, by one or more of the parties involved in a natural-resource management problem. Although they aim to produce knowledge about resource management, studies using computer-based modeling are most often developed with little or no interaction with local actors. That is, they fall within “laboratory research” and “field research” (“Modes” I and II, respectively, of Hatchuel, 2001). Because they maintain such “distant” relationships with local actors, they are poorly suited for considering their constraints and objectives in a given context (Larsen et al., 2012). Additionally, McCall and Dunn (2012) stress the lack of methods that capture, represent, and integrate local knowledge to better address local knowledge in natural resource management.

Yet, the spatial management of water resources is a complex and trans-disciplinary problem that involves many actors with divergent interests (hereby called *stakeholders*), at different levels of action (IAASTD, 2009). It requires the collaboration of policy makers, experts, lay persons and researchers (Newig et al., 2008). To understand such situations where “facts are uncertain, values in dispute, stakes high and decision urgent”, Funtowicz and Ravetz (1993) explain that society and science must move forward together through dialogue. The challenge is then to implement “research-oriented partnerships” or “intervention research” (“Mode III” in Hatchuel, 2001), in which scientists are in charge of creating intermediary objects (“a sort of arrangement that allows different groups to work together without consensus” in Leigh Star, 2010; e.g. maps, computer or conceptual models, role-playing games) and collective action processes that enable stakeholders to deal with their specific natural-resources management problem. Research activities should bring science into the action process, typically with approaches from the “Sciences of Design” (Hatchuel & Weil, 2002; Martin, Martin-Clouaire, & Duru, 2012; Nassauer & Opdam, 2008; Tittonell, 2013). In design activities, researchers are in charge of managing the boundaries between knowledge and action so that practical problems will influence scientific inquiry and scientific knowledge will be useful in decision making i.e. credible, salient and legitimate.

“Credibility involves the scientific adequacy of the technical evidence and arguments. Saliency deals with the relevance of the assessment to the needs of decision makers. Legitimacy reflects the perception that the production of information and technology has been respectful of stakeholders’ divergent values and beliefs, unbiased in its conduct, and fair in its treatment of opposing views and interests” (Cash et al., 2003).

To address these science-society interface issues, we developed a participatory methodology to design and to assess alternative AL in a river basin experiencing quantitative water imbalance. This methodology, hereafter called design-and-assessment (D&A) methodology, aims to incorporate different sources of knowledge and support a social learning process to enable social negotiation of satisfying solutions rather than computation of optimal ones (Giampietro, 2002; Newig et al., 2008; Pahl-Wostl & Hare, 2004; Sterk, Leeuwis, & Vanittersum, 2009). Organizing information flows is one of the key scientific challenges of such a D&A process (Alcama, 2008; Leenhardt et al., 2012; Martin et al., 2012; Olsson and Andersson, 2007). Boundary objects, developed by scientists, are used to facilitate expression of knowledge, mutual understanding and development of shared representations of the system and expected or desired changes. The D&A methodology we propose is composed of three collaborative steps (Barreteau et al., 2010) (1) representation of the AL in respect of quantitative water management issues, i.e. distribution of CS in the landscape, (2) design of alternative AL, and (3) integrated assessment of alternative AL effects on water resources via a multi-agent simulation platform. The main challenge of this third step is to simulate functioning of the entire social-ecological system (Ostrom, 2009) i.e. interactions between AL, water-resource and normative aspects (water releases from dams and water-use

restrictions). All three steps are participatory, i.e. they involve both researchers and stakeholders, and may constitute iterative cycles. This article focuses on the description of the collaborative design activities (step 2, hereafter called co-design). We only briefly describe step 1 to show its importance in implementing step 2, and do not describe step 3. Steps 1 and 3 will be the subject of future articles.

Hereafter, we first present the study area and second the methodology for the collaborative design of alternative AL. We then provide two examples of alternatives designed by stakeholders. Finally we discuss the integration of this design exercise within the entire iterative D&A methodology.

1 Materials and methods

The D&A methodology was implemented in a region where the high irrigation requirements of the dominantly maize-based CS are incompatible with the current availability of water. Water availability is in fact constrained by a legal framework that requires environmental low-flows of rivers to be respected using either dam water storage or setting withdrawal restrictions. We collaborated with stakeholders concerned by quantitative water management issues, both those involved in agriculture and those involved in water management. In total, 62 people participated in the study in either expert interviews, semi-directed interviews on farms, workshops for participatory mapping, or workshops for designing options for change.

1.1 Study area

In the Adour-Garonne basin in southwestern France, the local state services regularly intervene to manage what are commonly called “quantitative water management crises”, i.e. when river flows fall below legal thresholds that are supposed to ensure proper functioning of aquatic environments. They use two main mechanisms to protect water flow: releases from large collective reservoirs and withdrawal restrictions. Agriculture is most affected by withdrawal restrictions, being responsible for a mean of 80% of water withdrawals during low-flow periods. Irrigation is used to enable cropping on soils considered unsuitable for winter cereals or non-irrigated spring crops (locally called *boulbènes*). Maize, especially maize monocropping, which has well-known economic and organizational advantages for farmers and agricultural supply chains, is the dominant irrigated system. Debates about irrigated systems’ impacts on water resources focus on this CS. Our case study is representative of this situation. We chose the Aveyron river basin to demonstrate our D&A methodology since it is one of the most controversial areas of the Adour-Garonne basin. It features one of the greatest gaps between water resources and water requirements for irrigation; therefore water-management crises are frequent and recurring (many times per year, year after year). Also, the recent failure in building a shared plan to manage low-flow periods revealed the existence of a challenge to their governance.

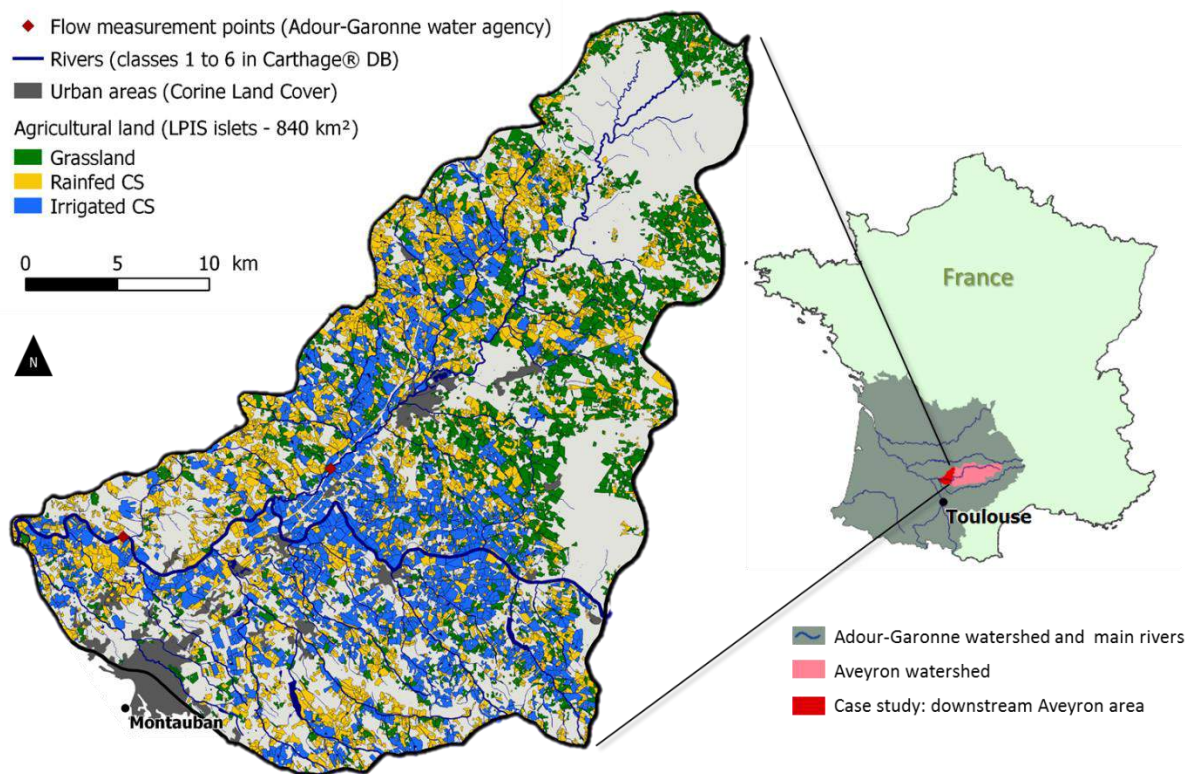


Figure 23. Location and land-use map of the study area (downstream of the Aveyron river basin) located in the Adour-Garonne basin (southwestern France). The land-use map shows delineation of agricultural islets in the 2009 French “Land Parcel Identification System” (LPIS) and information extracted from analysis of the 2006-2009 LPISs: grassland, rain-fed and irrigated CS.

We focused on the downstream portion of the basin, an irrigated landscape of more than 800 km² (Fig. 1). This area was delineated as an aggregation of sub-watersheds and covers about 16% of the total Aveyron basin area. Mean volumes withdrawn for irrigation every year reach approximately 18 hm³, which represents 70% of the agricultural withdrawals of the entire Aveyron river basin. Feedstock cereals and maize cropping dominate the area, with numerous patches of fruit and high-income seed-production fields. Animal production, especially bovine, is in decline and pushed to the less-productive outlying hills and plateaus and to the upstream area of the river basin. The utilized agricultural area (UAA) is about 40,000 ha. There are about 1,150 farms, of which 43% are irrigated, with mean farm irrigated area equal to 38% of farm UAA (French Land Parcel Identification System in 2009).

1.2 Collaborative representation of the current agricultural landscape

During step 1 of the D&A methodology, we co-constructed a model of the current AL, which corresponds to a spatially explicit representation of CS spatial distribution in which CS are described with decision rules (see Murgue et al., 2015). Our approach was based on the integration of “hard” and “soft” knowledge (Silvio Funtowicz & Ravetz, 2003; Pahl-Wostl & Hare, 2004; Yeager & Steiger, 2013), i.e. on the analysis, comparison and integration of existing quantitative spatial databases (both systematic at the national level or produced by local organizations for their own purpose), spatial dynamic models from research institutions, and knowledge from stakeholders and experts.

The development of the AL model into a Geographical Information System (GIS) was based on the use of French “Land Parcel Identification System” (LPIS) geographical database (Inan et al., 2010) for the years 2006-2009. The

LPIS provides the geographical position (spatial delineation) of farmers' field blocks (Sagris, 2013), hereafter called "islets", which contain one or many contiguous agricultural fields (Fig. 2). Each islet is delineated by permanent physical elements of the landscape such as roads, hedges or forests, and is managed by one farm unit. LPIS also provides annual information about the crop area within each islet and about the set of islets belonging to each farm using a farm identifier.

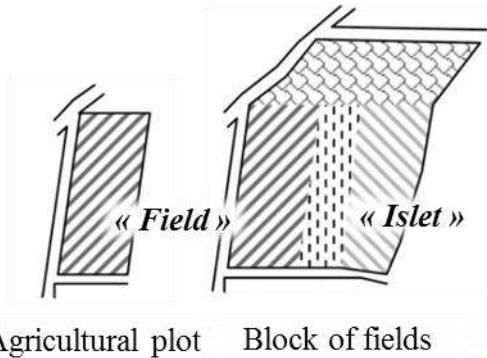


Figure 24. Key information provided by the French "Land Parcel Identification System" (LPIS) geographical database, and corresponding terminology used in this article. The LPIS provides spatial delineation of islets (block of fields) and annual crop area(s) (ha) within each islet (annual area of fields) for each year for 2006. Adapted from Inan et al. (2010).

We determined the crop sequences of each field in each islet of the study area through analyses of LPIS from 2006-2009. For this we examined the islets' spatial filiation over the years and then analyzed the dynamics of crop area within islets over the years (conservation, aggregation or disaggregation). This work resulted in a wide diversity of crop sequences for the entire study area, hereafter called "observed sequences". To deal with this complexity we organized a participatory mapping workshop (Table 1b) where we asked local agriculture experts to identify and describe the main CS in the area and the determinants of their spatial distribution. They described the main rain-fed and irrigated CS using rotation types (species, as well as cultivars for maize), soil types and farm types considered as the main determinants of their spatial distribution. We integrated this information in the GIS so we could allocate a value for each determinant to all fields of the LPIS in addition to the observed crop sequence. We then selected a sample of 27 farms, identified by experts as representative of the different production situations (soil-farm type combinations) to carry out semi-directed interviews about crop management strategies for the key technical operations for soil-water dynamics and irrigation: tillage, sowing, irrigation, and harvest. These management strategies were associated with a rotation type, soil type and farm type, and therefore distributed over the landscape.

Table 4: (a) List of participants and (b) sequence of interactions between local stakeholders and researchers in steps 1 and 2 of the Design and Assessment (DaA) methodology. Co-design workshops (composed of the sequences in Fig. 3) were held separately with a group of agricultural profession representatives and with a group of guarantors of water and aquatic environment (WAE).

(a) Participant typology and affiliation. Numbers in italics indicate the number of people of each type. "Department" refers to a.

Agricultural profession group	WAE guarantor group
<ul style="list-style-type: none"> a. Farmers (<i>27</i>) b. Presidents of irrigator associations, also active farmers (<i>4</i>) c. Representatives of farmers' unions (<i>2</i>) d. Agricultural extension officers: local-level French Chamber of Agriculture (<i>2</i>) e. Local cooperatives (<i>2</i>) 	<ul style="list-style-type: none"> f. Local state service (<i>DDT</i>) in charge of issuing water withdrawal permits, water-use restrictions, and water releases (<i>3</i>) g. Local water police office (<i>ONEMA</i>) in charge of monitoring the state of French watercourses (<i>2</i>) h. Local political counsel (<i>conseil general</i>) in charge of the operational management of water releases from dams (<i>1</i>) i. Local actors involved in protecting aquatic environments (fishery federation, municipalities, non-governmental organizations) (<i>3</i>)

(b) Sequence of interactions between the researcher team and local actors

DaA step	Type of interaction	Time period	Participants
Representation of the current system	Explorative, semi-directive interviews	January 2012	b, d, e
	Participatory mapping workshop	May 2012	a, b, c, d, e, i
	Farming systems surveys	July 2012	a, b
Co-design of alternatives	workshop - Agricultural group	March 2013	a, b, c, d
	workshop - WAE group	March 2013	f, g, h, i
	GIS workshop - Agricultural group	June 2013	a, b
	GIS workshop - WAE group	June 2013	f, g

1.4 Collaborative design of alternative agricultural landscapes

The co-design step is summarized in Fig. 3. Its goal was to allow for explicit description and formalization of visions that stakeholders hold (“visioning” in Salter et al. (2010)) about solutions to quantitative water management problems in their territory that address their concerns (e.g. viability and technical nature of farming systems, protection of aquatic environments). The hypotheses underlying the development of the co-design method are (1) stakeholders have a vision of possibilities for change to resolve their problems that draws upon, among other things, the spatial distribution of agricultural practices; (2) they can express these visions at the AL or even the entire social-ecological system level by setting aside the contingencies of their own level of activity (e.g. farming systems for farmers) while considering the economic, technical, and organizational issues of their sector of activity; and (3) spatially explicit modeling, used as a boundary object, can help to express and formalize these visions. To ensure a certain degree of openness, we selected participants from step 1 who had expressed interest in our approach.

We used participatory methods to map out the diversity of viewpoints (van Asselt & Rijkens-Klomp, 2002). Considering our case study, one challenge was to implement design activities in a situation of conflict between environmental groups and the agricultural world. In the Adour-Garonne basin, it is common for the latter to refuse to discuss changing their practices to manage water demand. To overcome the conflict situation and because some participants from each viewpoints mentioned explicitly that they would prefer to work separately, we chose to lead discussions within two distinct groups of stakeholders. The groups have, in theory, divergent positions in debates about quantitative water management: one with representatives of agriculture (“agricultural” group), the other with representatives of the environmental issues addressed by the French Law on Water and Aquatic Environments (“water and aquatic environment” (WAE) group) (Table 1a). Conscious of the need to assemble water-management and land-management stakeholders (Gober et al., 2013; Narcy and Mermet, 2003), we nonetheless considered the separation necessary to facilitate expression of original options for change, not only those corresponding to the traditional elements of existing conflicts: creating reservoirs vs. reducing the volume available for withdrawal.

The co-design process was based on the flow of information between participants (designers of options for change) and the research group, and was facilitated by the existence of the spatially explicit model of the AL (formalized in and manipulated through a GIS). As Barreteau et al. (2010) recommend when using models in participatory approaches, we clearly presented it to participants, even though some had participated in its co-construction, and we also specified the role of the model to ensure their understanding and acceptance of the methodology. The following paragraphs present the two main parts of the co-design process: design workshops and formalization.

1.4.1 Revealing stakeholders’ visions

The design activities (run in parallel with each stakeholder group) were performed separately but used exactly the same approach. They were organized and facilitated to open up the “possibility space” to a diversity of individual visions and then to narrow it towards what the group would collectively define as the most feasible and interesting options. We organized the sessions into four sequences held in two workshops (Fig. 3), which aimed to consecutively answer the following questions:

Sequence 1: What do you expect from this research project?

We asked this question after introducing the research project and the design workshop objectives to facilitate open discussion with participants about their expectations. This phase of the workshops was particularly useful for raising the inevitable debate over increasing agricultural water supply as a solution to the quantitative water management crisis. This provided us the opportunity to explain why this subject was not included in workshop objectives, without denying the need to debate it. The discussions, especially with the agricultural group, defused

tensions and clarified the position of our research project in relation to local socio-economic and institutional issues. It also allowed participants to share the diversity of their viewpoints about quantitative water management issues and the assessment criteria they use to evaluate the sustainability of their activities and of the social-ecological system considered.

Sequence 2: What changes in cropping systems could reduce the risk that crises occur?

The effective design process started by introducing a central question to be addressed. Collective discussion about its relevance led both groups to adapt the question, mainly by introducing, more or less explicitly, the notion of economic sustainability. Once the question was stabilized and accepted by the group, the objective was to encourage each participant to express his/her individual ideas for possible changes to the current situation (e.g. replace one CS with another) and then to identify which of them were shared within the group. To achieve this we organized a brainstorming session in both workshops, in which a facilitator from the research group allowed all participants to express their views and framed the discussions to identify convergent ideas and minimize off-topic subjects. We first used index cards placed on a board to render participant ideas concrete. Then, we asked participants to collectively organize their ideas into groups of similar ideas, that is, ones that aim to attain the same objectives or use the same types of action to attain objectives (Fig. 4a). Then, each participant had to place stickers on the three ideas or group of ideas that he/she considered most interesting, taking into account their feasibility.

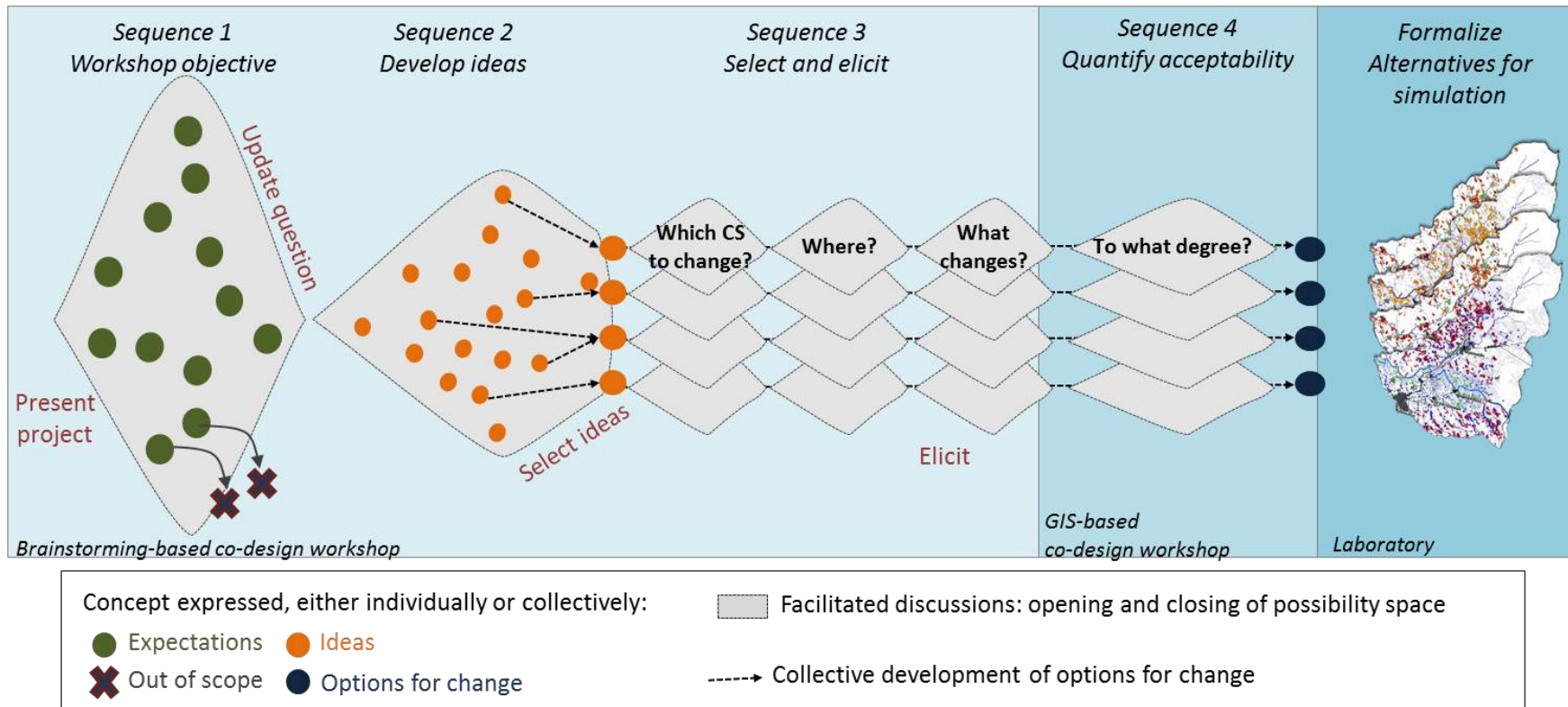


Figure 25: Organization of the design process into four participatory sequences (i.e. objective-oriented interactions with local stakeholders) and a formalization step performed in the laboratory. The first sequence is a discussion on the purpose of the overall Design and Assessment methodology; it aims to collectively update the design question. The second sequence, a brainstorming session, aims to identify then to select key ideas for change in the current agricultural landscape. The third sequence aims to detail each of the selected ideas by discursively answering the following questions: Which element to change (e.g. of a cropping system (CS)? Where (e.g. a soil type)? What change(s) to implement (e.g. an agricultural practice)? In the fourth sequence, interactive use of the spatially explicit agricultural landscape model, implemented in a GIS, allows participants to define acceptability thresholds of investigated changes (e.g. maximum area in the farm area). Facilitators formulated the questions in the third section to obtain sufficient information to formalize (model) options into alternatives in the laboratory. In each sequence, the facilitators' objective was to manage the widening of the possibility space and then to refocus it on key elements while eliciting tacit knowledge.



(a)



(b)

Figure 26: Participatory design workshop photographs of (a) brainstorming and organization of ideas by the agricultural group (in blue: individual ideas, in red: collective naming of groups), and (b) simplified mapping to detail an option by the water and aquatic environment group

Sequence 3: Which of these ideas do you find most interesting? In what production and environmental contexts could they be applied?

In the third sequence we organized a collective selection of the ideas that seemed most interesting (i.e. with the most stickers) to the majority of the group. For this selection, we also asked the group to consider the feasibility of the options in the current socio-economic context. Our objective was to capture the most plausible options for change, considering that groundbreaking options would be dealt with later in the entire D&A methodology through subsequent iterations of the design step. We asked the group to detail the implicit objectives of each option selected (i.e. What concerns can it satisfy?) to define the evaluation criteria. Next, we asked participants to detail the options by identifying which elements of the system were potentially affected by change (e.g. which fields, which farms, which resource or withdrawal point). They were also asked to describe location-based criteria, if possible, which was supplemented by drawing on a simple map when the criteria could be delineated at the scale of the case study (Fig. 4b). The drawings were representative of the groups: they were drawn by a stakeholder or a researcher in interaction with the other participants.

Sequence 4: What degree of change seems acceptable?

To conclude this description of options, we asked the groups to discuss the degrees of change acceptable for applying the transformation, i.e. thresholds of technical, economic, and organizational acceptability for farms (e.g. the maximum area needed for a crop on a farm) and the nature of spatial entities.

To achieve this, we performed a dedicated participatory mapping exercise (*GIS workshops* in Table 2b and Fig. 3) with each group using the GIS of the social-agro-hydrological system (section 2.2). Iteratively, the group defined thresholds, researchers translated them into spatial queries in the GIS and displayed the characteristics of entities corresponding to these queries (e.g. number, area and nature of fields and farms), and participants refined or validated the acceptability threshold.

Table 5. Potential annual impacts of two alternatives based on crop sequences reconstituted through analysis of the Land Parcel Identification System from 2006-2009 and with the 2009 crop distribution. Estimates of affected volume are based on mean annual irrigation dosages for maize provided by local experts (250 mm in alluvial soils and 180 mm in limestone slope soils). Alternative 1a develops early sowing of maize early cultivars. Alternative 4b replaces maize monoculture with maize-wheat rotations.

Alternative	Area impacted annually (ha)	Estimate of the volume affected (hm³)	Area impacted in 2009 (ha)	Estimate of the volume affected in 2009 (hm³)
1a	614	1.50	508	1.10
4b	249	0.45	236	0.43

General position of researchers and options for change

During discussions throughout these four sequences, the researchers' objective was to lead stakeholders to specify and, if possible, quantify, as precisely as possible, descriptive variables that they used in their discussions so that the descriptions approached the format of model input as closely as possible. This process of "defuzzification" of stakeholder narratives reduced ambiguities and enabled researchers to produce firm and salient knowledge from stakeholder proposals (Alcamo, 2008).

The discursive description of an idea or group of ideas for change, in a form that is explicitly detailed (including the acceptability threshold), stable and accepted as such by the group, is called "options for change".

1.4.2 Formalizing options for change in the laboratory

This step aimed to translate (qualitative) options for change into formal, i.e. quantified and spatially explicit, representations that may be used as inputs to a simulation platform in the "assessment" step of the D&A methodology. The formal representation of one or a combination of options for change in the GIS is called hereafter an "alternative". The formalization process is based on identifying fields of the AL that match the groups' description of an option for change (e.g. field with a CS type in given soil and farm types) and assigning the new CS they described to the fields.

First, we identified the potentially impacted fields, islets and farms, hereafter called "candidate elements", using spatial and attribute GIS queries based on participants' selection criteria. We created a list of candidate elements by starting at the field level for tributary information but also by considering spatial location and delineation at the islet level. The descriptive criteria used by stakeholders deal with the nature of existing CS (typical rotations and associated practices), the location of fields in relation to other territorial elements, especially the main

resource types (e.g. private dams, rivers, and groundwater), the soil, the hydrological system, and the spatial units that managers focus on (e.g. restriction units, at-risk streams).

Second, we estimated mean areas and the number of fields impacted annually due to current or proposed rotation practices. To do so, we assumed that the annual crop area of farms reflected the rotation practices implemented by farmers and used the information on crop rotations estimated at the field level through the analyses of the LPIs (2006-2009). For options aiming to change maize cultivars, we calculated a mean annual impact area depending on the proportion of maize in the current rotation (e.g. $Area_{\text{impact}} = Area_{\text{cand}} \times 0.5$ when maize alternates with a winter cereal every two years). Similarly, for options aim to change rotation practices (e.g. alternate maize with winter cereals instead of maize monocropping), we used the difference between the proportion of maize in the existing rotation and that of the rotation to be implemented. For example, if the option for change corresponds to replacing maize monoculture by a rotation with one year of maize followed by two years of wheat ($Area_{\text{impact}} = Area_{\text{cand}} \times (1.0 - 0.75)$).

Third, we took into account the degree of acceptability expressed by participants, e.g. a maximum percentage of the total maize area or the UAA of farms. To achieve this, we selected candidate fields within each farm with the rationale of minimizing the number of fields and the distance between them until the acceptability threshold is reached.

Finally, to preliminarily quantify the potential impact of the alternatives on water withdrawals for irrigation at the irrigated landscape level, we used rough estimates of the mean volume of water used for maize irrigation for the two most typical soils in the investigated zone: 2500 m³/ha/year on alluvial terraces and 1800 m³/ha/year on clayey limestone slopes. These values originate from data collected from farm surveys performed during step 1 of the D&A methodology.

2 Results

2.1 Results of the participatory workshops: ideas and options for change

This section provides an overview of the workshops' outcomes. We differentiate the main results between *ideas* and *options* for change for each of the two groups. Ideas are presented as the intermediate results that enabled the production of options for change. Appendix 1 presents a summary of the options produced during both workshops.

2.1.1 The agricultural group

The agricultural group's ideas covered technical aspects at the plant or field level (e.g. cultivar choice, tillage), agronomic aspects at the farm level (e.g. rotation practices, yield targets), and socio-organizational aspects at the territorial level (e.g. information exchange between farmers and water-release managers, optimization of releases). With these ideas, the agricultural group sought (1) to reduce water demand for irrigation in zones or farming systems for which demand is high (i.e. maize-based systems, alluvial terraces) and distribute the demand over the growing season, and also (2) to improve management of water releases from dams by providing dam managers with better information about the level and dynamics of agricultural needs during the irrigation period. Due to the many ideas identified, the detailed list is not presented.

The options for change that this group identified and then stabilized for formalization (see Annex 2) only deal with CS and their distribution within the irrigated landscape. They involve choice of maize sowing date and cultivar earliness (option 1 in Annex 2), crop choice and rotation practices (option 2), and even the design of an innovative CS (option 3 in Annex 2). This latter proposes combining two non-irrigated crops within the same cropping season (a winter cereal harvested early, then sunflower sown late with little or no irrigation) as an alternative to maize, offering, according to the group, a similar gross margin. The agricultural group provided

detailed descriptions of the technical and spatial constraints involved in implementing these changes (mainly soil criteria). In the second workshop, dedicated to determining the acceptability thresholds, the group discussed the socio-economic acceptability of options based on their compatibility with work organization and gross margin per CS (and thus farm income). The discussions ended with the production of acceptance criteria for each option, expressed as a maximum area impacted per year, either of the UAA or annual maize area.

2.1.2 The WAE group

This group focused its ideas for change on the locations where it considers irrigation incompatible with sustainable water management: watersheds of tributary streams where irrigation cannot be compensated by water releases (“non-recharged” streams). The group spontaneously proposed a project called “territorial reorganization” (see Annex 1) which revolves around several types of ideas (technical, organizational, spatial) at several levels of organization (field, farm, hydrological units, and other landscape units).

The option for change described by the group and presented below (option 4 in Annex 2) involves few details about agricultural practices. Instead, the group focused on identifying priority zones by citing location criteria based on the type of water resource and the pedo-morphological zones concerned. The group also proposed improving the exchange of information between irrigators and dam managers to optimize water releases as a function of agricultural needs.

2.2 Formal and spatially explicit representation

To provide an example, we present the result of two alternatives (formal representations of options for change). The first alternative presented comes from the agricultural group and focuses on choices of maize cultivars and sowing dates (Annex 2, option 1a). The second is based on an option of the WAE group, which focuses on decreasing the risk of “non-recharged” streams in watersheds. To the latter, we added an acceptability threshold determined by the agricultural group (option 2a: a maximum of 40% of the annual maize area) to show that options from the two workshops can be combined when formalizing an alternative.

2.2.1 Alternative 1a: spread the peak of maize irrigation needs

This alternative concerns agricultural land that warms up the fastest at the end of winter, i.e. two soil types locally called “alluvial soils” and “good *boulbènes*”. On these, the agricultural group proposed to change planting practices and replace the current late-flowering cultivars of irrigated maize with early cultivars, with the aim of moving the flowering period earlier and thus the peak of water withdrawals. At the irrigated landscape level, the objective is to spread the maize flowering period, which currently occurs at the end of July, in the middle of the low-flow period, to the end of June or beginning of July, the beginning of the low-flow period, when flows tend to be higher. We identified candidate areas by selecting fields whose observed crop sequence included maize and that were located in an islet with the “alluvial” or “good *boulbène*” soils. The candidate areas add up to 2,268 ha.

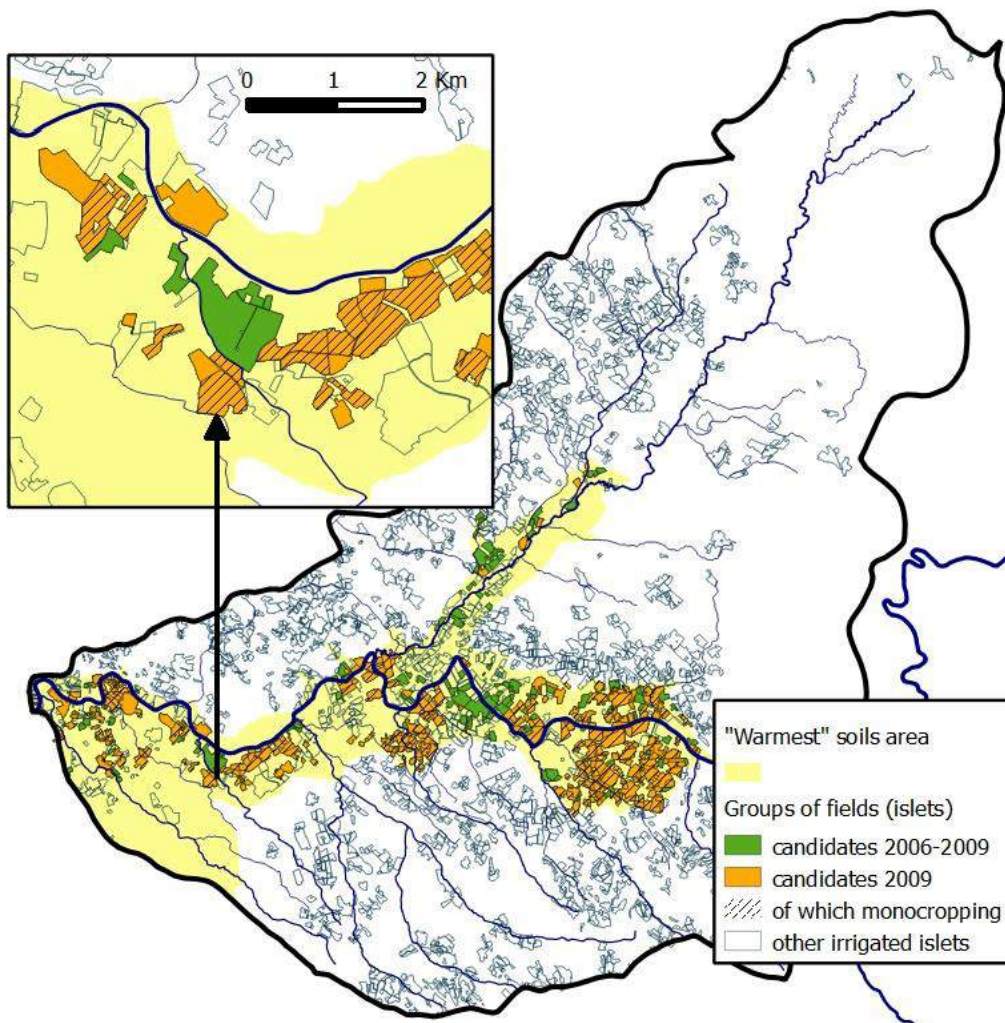
We then estimated the number of fields and hectares impacted considering a degree of acceptability as specified by the agricultural group (20% of the annual maize area of the farms). For alternative 1a (Fig. 5) the acceptability threshold strongly influenced the area of candidate fields actually impacted. For example, considering crop sequences in 2009, 1,870 ha are candidates, and the acceptability threshold brings it to 508 ha impacted. Also, the annual crop area implies a variation of impacted fields and farms between years. Based on the reconstituted crop sequences between 2006 and 2009, we estimated the annual impact of alternative 1a to be 23% (614 ha) of the candidate area in an average year. Among 136 candidate farms, 112 are impacted annually, which is approximately 10% of the total number of farms in the case study.

2.2.2 Alternative 4b: modification of rotations irrigated with water from non-recharged streams

This alternative is based on option 4b. It suggests replacing monoculture or pseudo- monoculture maize (maize three years out of four or two years out of three) that are irrigated from a non-recharged stream by sowing winter cereals every other year, instead.

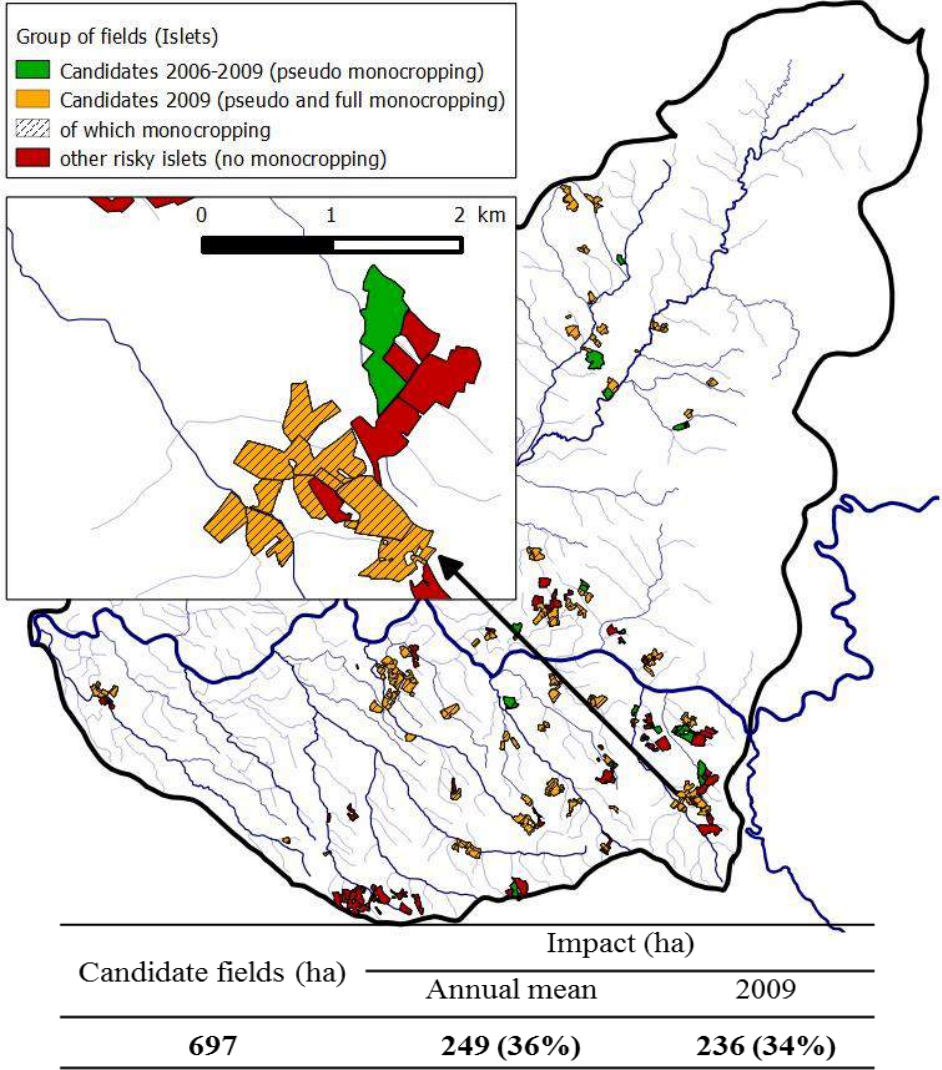
To estimate the area impacted annually, given the acceptability threshold described by the group for option 2a, we limited changes to 40% of area in maize monocultures or pseudo-monocultures of the candidate farms. In the estimated impacted area, 249 ha are divided among 155 fields and 73 candidate farms, of which 61 were impacted in 2009 (Fig. 6). In this alternative, application of the acceptability threshold had little influence on the area of candidate fields impacted, reducing it only by 5%.

Figure 27. Location of candidate islets for alternative 1a (use early flowering maize cultivars, sown early in warmest soils to spread the peak in irrigation demand). The map shows islets with fields impacted every year (monoculture) and those impacted in 2009 (maize monocropping and in rotation, 1,870 ha). The table shows the area of whole candidate fields (maize is present at least one of the four investigated years, 2,268 ha), the estimated mean area impacted annually from 2006-2009, and the area impacted in 2009 for alternative 1a.



Candidate fields (ha)	Impact (ha)	
	Annual mean	2009
2 268	614 (23%)	508 (19%)

Figure 28. Location of candidate islets for alternative 4b (replacing monoculture or pseudo-monoculture maize that are irrigated from a non-recharged stream by maize/cereal rotations). The map shows islets where maize was present at least 75% of the time from 2006-2009 (pseudo monocropping), candidates fields in 2009 and other islets irrigated by non-recharged streams (where there is no monocropping). The table shows the area of candidate fields, the estimated mean area impacted annually from 2006-2009, and the area impacted in 2009 for alternative 4b.



2.3 Estimated potential impact of alternatives on agricultural water withdrawals

The objective here is not to present the integrated assessment step of the D&A methodology, but to show an initial quantitative estimate of the potential impact on agricultural withdrawals of the two alternatives presented above (Table 2). We estimate that alternative 1a and 4b have the potential to impact, respectively, 1.50 and 0.45 hm³ of the demand in an average year. Here, “impact” means to diminish or spread. These volumes should be compared to the estimated imbalance between supply and demand in the watershed in a five-year dry period: 6.7 Mm³ (Daubas & Dupuis, 2009). They thus represent 25% and 40% of the shortfall, respectively.

This highlights that alternative 1a proposed by the agricultural group impacts a much larger volume than alternative 4b. However, it only influences the temporal distribution of crop needs by spreading the demand when water is statistically more available in soils and water bodies. The volumes that would be saved with this type of alternative thus depend on the natural water availability at the beginning of the low-water period, which differs each climatic year. We note that spreading demand over the season aims not only to decrease withdrawal,

but also to ease management of dam releases by decreasing the intensity of dam releases during the low-water period.

In contrast, the quantitative effect of option 4b is lower but represents an absolute decrease in demand regardless of the climatic year. Based on data from the French national water withdrawal database, we estimate that the proposal of the WAE group would have reduced mean absolute demand in the non-recharged streams by approximately 40% over the years 2006-2009.

3 Discussion

3.1 Place of design step 1 the D&A methodology

In the implementation of our D&A methodology, co-representation of the current AL (step 1) played a crucial role in laying the groundwork for the collaborative design activities. First, it served as a “problem-definition phase” (Bots & Daalen, 2008). It favored specification of the AL issues regarding quantitative water management and therefore indicated the issues to address in design activities (i.e. what type of cropping system is challenging, what specific resource/watershed is at stake). Step 1 also prepared the research team for the co-design step. Second, it provided the biophysical and socio-economic place-based knowledge necessary to efficiently interact with stakeholders throughout design activities, i.e. to push them to clarify implicit or tacit knowledge used to express options for change. Therefore, we think that in such design activities dealing with complex systems, collaborative representation of the current situation of the system at stake ensures credibility, saliency, and legitimacy of outcomes.

We purposely decoupled the co-design phase from the integrated-assessment phase in our D&A methodology for two reasons. The first was to give free rein to participants’ creativity without participants having to think about formalization and assessment processes. The second was that the complexity of the object to design, i.e. the AL, renders formalization of the options difficult to achieve during design workshops. Our D&A process is preferably organized in successive and iterative phases of participatory design followed by simulation in the laboratory (simulations) and then followed by collective assessment of simulation outputs. The alternatives described here correspond to the outputs of the first cycle of design, and their formalization will enable their simulation and collective assessment. We assume that the groups can then perform several iterative loops, refining designed alternatives or designing new ones. The knowledge analyzed would thus become increasingly quantitative and factual, and the degree of assessment complex, targeted at the levels of organization that interest the participant group.

3.2 Using a design approach ensures useful interactions between science and action

Our work is innovative within design sciences (Hatchuel, 2002) because of the scale and nature of the designed object, an 800 km² irrigated landscape. It participates in the development of “landscape design” research that aims to improve the credibility, saliency, legitimacy, and in turn, usefulness of scientific knowledge about the relationship between landscape pattern (here CS pattern) and landscape processes (here mainly hydrology) (Nassauer & Opdam, 2008).

As recommended by Nowotny et al. (2001) and Nassauer and Opdam, 2008, throughout both representation and design steps, we implemented high and regular exchange of knowledge between science and practice. This enabled the creation of a common knowledge background between researchers and stakeholders, hence the saliency and legitimacy of scientific outcomes. More precisely, this knowledge exchange ensured that research outcomes appear relevant to place-specific agricultural and water management issues and respect local agricultural and WAE stakeholders’ viewpoints and values. It also makes the knowledge-production process transparent, mainly by making stakeholders’ and researchers’ hypotheses explicit.

In their analysis of the effectiveness of scientific information in societal decision-making, Cash et al. (2003) stress that saliency and legitimacy are often at odds with credibility. To ensure the credibility of outcomes of the design activity, we adopted a research-intervention approach in which scientists actively participate in the design process and make it part of their scientific approach. Emphasis is placed on transdisciplinarity, a complex system approach, collaborative production and transparent integration of knowledge by scientists and stakeholders as credible means for addressing complex societal problems (Bammer, 2005; Liu, Gupta, Springer, & Wagener, 2007; Tress, Tress, & Fry, 2005).

Finally, our design approach is based on the combination of “soft” and “hard” methods. We use soft methods for interacting with stakeholders and designing change options under investigation, which ensures the legitimacy of our D&A process because it avoids the *black box effect*. Hard methods were used to characterize entities and areas concerned with alternatives and to assess impacts of the alternatives by using indicators such as water volume withdrawn for irrigation. Hard methods, by providing quantitative and stable information, ensure the credibility and saliency of the D&A outputs.

3.3 Enabling design at landscape level

Performing a design process on an object as complex as an AL poses many problems. Such exercise is difficult because each actor understands this complex system according to his/her own interests, activities and management strategies. From an agricultural viewpoint, agricultural practices are the result of decisions of individual farming systems involved in socio-professional networks (Vanclay, 2004). From the viewpoint of water managers, agricultural practices are considered at the watershed level only via their expected short-term impact on streams: withdrawal peaks.

To surpass this problem, we set up a facilitated design process that allowed the groups to follow their own logic and move progressively through the different levels of organization of the social-agro-hydrological system. As foreseen, the agricultural group began the design process by defining options for change in rotation practices and crop management at the field level and then, prompted by the researchers, described farming systems and soil and climate zones in which the changes in practices could occur. This climb from one hierarchical level to another allowed farmers to progressively capture the systemic dimension, which is not often considered in their decision-making process. In contrast, members of the WAE group started by breaking down the AL into watersheds, beginning with the highest levels. They then integrated, little by little and only partially, other domains and organization levels, such as farming systems and CS.

The description of changes was always performed in reference to the current situation. This position has the advantage of being simple and intuitive for participants of the design workshops but has the disadvantage of encouraging the formulation of incremental changes in (vs. breaks with) the current situation. We assume that this limitation could be surmounted by the iterative aspect of our D&A methodology, as argued in section 4.5.

3.4 A side effect of our approach

We envisioned participation not as a goal but as a way to incorporate local actors’ knowledge and values. The objective was to reveal and formalize the diversity of viewpoints, not to obtain a consensus (van Asselt & Rijkens-Klomp, 2002). To overcome the conflict situation and facilitate abstraction and imagination during the workshops, we decided to perform the exercise in two distinct groups.

After informing each group about the nature of options for change designed by the other group, both groups clearly expressed a desire to know more and to discuss them during a meeting mixing participants of the two groups. Separation of the two interest groups, rather than reinforcing barriers between them seems, on the contrary, to have piqued each group’s interest in the results of the other. Even though it was not designed as

such, our design approach turns out to have the potential to be a mediation process that can increase the desire of stakeholders involved in the quantitative water management conflict to share ideas for change.

3.5 Role of alternatives

As explained by Beers et al. (2006), construction of shared knowledge in a multiparty group requires each member to externalize his/her knowledge, internalize the knowledge of others and then negotiate. Accordingly, we hypothesize that designed alternatives are formal representations of the knowledge externalized by the stakeholder group and accordingly can help both groups move toward a shared understanding of the problem and a shared representation of potential solutions.

These initial alternatives will also be used as “intermediate objects” in future D&A cycles to design new alternatives with potentially greater degrees of change and complexity. Iteration of design cycles should allow the group to progressively address the complexity of the entire social-ecological system in which the AL is embedded, manipulating not only agricultural domain elements but also those from hydrological, biophysical, and even water-resource management domains to describe and refine new options for change.

Conclusion

The results presented here, two alternative AL, are sample products of the one application of the co-design step of our participatory D&A methodology. This design process is based on combining hard and soft methods in a participatory process to address both water management and agricultural land-use issues at the landscape level. These alternatives were formalized by the research team from visions of change produced by two interest groups with, in theory, divergent opinions about the issue of quantitative water management. These are intermediate results of the project; they are used as input data in a multi-agent simulation platform which simulates interactions between the AL, the hydrology and the normative domains (water release from dams and legal water use restrictions) of a social ecological system to provide an integrated assessment of each alternative.

We expected, and the results confirm, that co-designing alternatives laid the shared foundation of knowledge required to identify the key elements of the AL that impact quantitative water management at the sub-watershed level. The process highlighted which interactions would be explored to address greater levels of complexity in subsequent design loops. Nonetheless, we did not expect that the framework implemented, which separated the two interest groups, would raise each group’s curiosity about the other. We now make the hypothesis, which needs to be tested, that the formal representation of visions as spatially explicit, quantified, and detailed alternatives is an intermediate object effective for laying the foundations of a multiparty discussion and introducing a mixed-design exercise.

Etape 3

A fine scale simulator of social-ecological system: impact assessment of cropping systems on water management

Clément Murgue*, Romain Lardy, Delphine Leenhardt, Olivier Therond
Agronomie, INRA UMR AGIR, 24 chemin de Borderouge, B.P. 52627, F-31326 Castanet-Tolosan, France
*corresponding author: clement.murgue@toulouse.inra.fr, Tel.: +33.5.61.28.50.43

Keywords

Quantitative water management, cropping systems, social-ecological systems, multi-agent simulation, spatially explicit modelling, MAELIA

Acronyms

MAELIA: Multi-Agents for Environmental norm Impact Assessment

SES: Socio-Ecological System

SAH: Socio-Agro-Hydrological

CMS: Crop Management Strategy

Abstract

Hydrological droughts result from interactions between hydrology, withdrawals, and water resource management practices. As other natural resource management problems they emerge from complex human-environment interfaces often called social-ecological systems. Participatory and modelling assessment methods are required to assess potential solutions to limit hydrological droughts. One scientific challenge is to ensure that these methods allow taking into account key interactions at the spatial and temporal resolutions that make sense for stakeholders and the problem at hand.

In this study we used a multi-agent simulation platform that allows simulating the day-to-day interaction between water users (agricultural activities), water resource (hydrology) and water governance, i.e. the functioning of the “socio-agro-hydrological system”, to assess impacts of alternative cropping system spatial distributions on different aspects of the water management problem. We briefly present the collaborative processes implemented for modeling the socio-agro-hydrological system and co-designing alternative agricultural landscapes. We then present the MAELIA multi-agent platform used to assess the co-designed alternatives: changes in maize cropping practices for specific situations of the agricultural landscape. These alternatives aim to either lower the mean annual withdrawal level (changes in rotation practices) or during specific time periods (changes in cultivar choices and sowing practices). Our simulations show that those alternatives, although they may have the desired impact on water withdrawal dynamics in particular situations,

do not provide a generic solution to the drought issue emerging from the whole “socio-agro-hydrological system” functioning.

Introduction

Droughts can be defined in many ways depending on our perception of the nature of issues: human needs or economic activities, natural habitats, resources, or even cultural values, norms and regulations. Hydrological droughts, can be defined as periods “with inadequate surface and subsurface water resources for established water uses of a given water resources management system” (Mishra & Singh, 2010). This definition points out that the emergence of droughts, like other natural management issues, not only depend on resource levels but also on usage (need and practices) and the management system (including operational water management and uses regulations). The “inadequate” water resource levels are generally defined in comparison to quantitative or qualitative thresholds established by the water governance framework (e.g. environmental flows). In other words droughts, like other natural resource management problems, emerge from complex human-environment systems and should be dealt with accordingly, i.e. taking all domains of the systems into account.

Ostrom (2009) provides a conceptual framework, the Socio-Ecological System (SES), which allows to decipher the main components, interactions and outcomes of such complex systems. SES are the ensemble of four main core sub-systems: (1) resource systems (e.g. hydrological systems), (2) resource units (e.g. water volume and flow), (3) governance systems (e.g. which regulate uses and manage water resources) and (4) users (e.g. individuals and collectives who use water). Some years before, Anderies, Janssen, & Ostrom (2004) highlighted the importance of infrastructure (e.g., dams, water distribution networks) in the robustness of SES. Hydrological droughts, like all other natural resources management issues, arise from interactions within SES, between those constitutive elements.

Due to the nature of SES, natural resources management issues like droughts should not be apprehended from a single perspective but instead analyzed with a trans-disciplinary approach. A major concern in natural resources management is to develop collaborative approaches to mobilize a diversity of actors from scientists to end users in the design of solutions (Giampietro, 2002; Reed, 2008). For authors in post-normal science (Funtowicz & Ravetz, 2003; Giampietro, 2002; Madrid, Cabello, & Giampietro, 2013), these multi-stakeholders approaches allow to explore a diversity of options and to identify satisfying solutions rather than the computation of optimal solutions (Giampietro, 2002). In these approaches scientists are responsible for developing the required tools and methodologies for the design and assessment of alternatives, or options. As explained by authors in the “Sciences of Design” (Hatchuel & Weil, 2003; Martin, Martin-Clouaire, & Duru, 2012; Nassauer & Opdam, 2008; Tittone, 2013), design activities help to bring research and action together so that practical problems influence scientific inquiry and scientific knowledge is useful for decision making i.e. credible, salient and legitimate. In these design and assessment methodologies, models are recognized to be good intermediary objects for designing and assessing solutions to natural resources management issues (A. Jakeman, Letcher, & Norton, 2006; Oxley, McIntosh, Winder, Mulligan, & Engelen, 2004; Sterk, Leeuwis, & Vanittersum, 2009), with many examples regarding water resources management (A. J. Jakeman & Letcher, 2003; Leenhardt et al., 2012; Letcher, Croke, & Jakeman, 2007). In the following, we use the word model to refer to any representation of a reality, may it be digital or conceptual, static or dynamic.

Guided by those principles for natural resources management, we developed a participatory and model-based method to assist stakeholders in the design and assessment of acceptable prospective solutions (hereafter called “alternatives”) to deal with drought issues at local level. This design and assessment (D&A) method structures the collaboration between scientists and actors of a SES, conceptualized as “social-agro-hydrological” (SAH) system. We used the terminology of SAH system to highlight that we specifically address quantitative water management issues emerging from the interactions between water governance, agriculture and hydrology, considering the role of hydraulic infrastructures in those interactions. We also conceptualize the SAH system as

a complex hierarchical nested system in which key interactions regarding water and agriculture management issues occur between multiple subsystems within between organizational levels (Ewert et al., 2011).

Our D&A method is based on the co-development and use of a multi-agent simulation platform (MAELIA, see Therond et al., 2014) that enables modelling and simulating the SAH system with fine spatial and temporal resolutions. Our modeling trajectory was guided by the principles of mixing hard and soft methods (Pahl-Wostl & Hare, 2004) and the objective of retracing key patterns and behavior rather than exhaustively representing mechanistic processes (Giampietro, 2002; Grimm & Railsback, 2012b). The simulation model we developed combines scientific and empirical knowledge, local expertise and large scale census data.

We applied our D&A method in a river basin experiencing strong and recurring quantitative water imbalance in the South Western France. The method follows three main steps (i) collaborative modeling of the SAH system with a focus on the cropping systems (CS) spatial distribution over the watershed, (ii) collaborative design of alternative SAH systems with a focus on changing the CS and their spatial distribution and (iii) use of the simulation platform to assess the potential of co-designed changes. While the first and the second step are detailed in Murgue et al., 2014a and 2015 respectively, this paper focuses on the third step. In the following section we present the case study, the collaborative modeling and designing activities and the MAELIA multi-agent modelling platform used to assess the alternative CS spatial distribution. We then present results of the simulation-based assessment of alternatives. Last, we discuss the results and analyze the strengths and weaknesses of our methodology and simulation tool.

1 Material and Methods

1.1 Case study

The Aveyron watershed (Figure 14, South-Western France) is one of the French river basin with the greatest deficit: 7 hm³ (estimated for statistically dry years - 2 years out of 10 -, equals about 40% of the average annual withdrawal volume). Furthermore the Aveyron River flow is frequently and persistently (many times a year, year after year) measured under the legal threshold set to guarantee good status of aquatic ecosystems (4 m³/s), and the flow of the small connected rivers are regularly disrupted (see Mazzega et al., 2014). These situations are called quantitative water management crises and hereafter referred to as *crisis situations*.

In the area, the daily dynamics of the rivers discharges are strongly determined by the dynamics of irrigation withdrawal demand, which can reach more than 3 m³/s on the Aveyron River (daily average, 75% of the environmental flow). These flow deficits are managed at the daily time scale through water releases from dams (for Aveyron River) and legal withdrawal restrictions (all rivers).

While these daily deficits are measured at hydrological nodal points, they result from site-specific day-to-day interactions between cropping practices, soil water content, water resources, weather variability and even normative decisions (releases from upstream dams and withdrawal restrictions). Potentially, only a few challenging withdrawal situations trigger the overall unbalance at basin level. To identify, characterize and handle causes of these recurrent deficits there is a strong need to produce a fine spatial description of the current CS spatial distribution and of their interactions with hydrology of water resources. CS spatial distribution includes a dynamic description of cropping practices which may influence intra seasonal withdrawal dynamics: tillage (modifies evaporation dynamics), species (water needs), cultivar choice and sowing date (temporal position of the growth cycle), irrigation. It also includes the description of crop sequences as it influences inter-annual withdrawal dynamics at field level.

We focused on the downstream portion of the watershed, an irrigated agricultural landscape of about 840 km². The area covers only 16% of the total basin area but irrigation water withdrawals reach 80% of the total irrigation

withdrawals on the whole basin (18 hm³). The landscape is composed of three main pedo-morphologic units: (1) flat alluvial terraces around the Aveyron River and its main tributary, with a gradient from deep alluvium sand soils to thin hydromorphic loamy silt soils (called “*boulbènes*”), (2) surrounding hill slopes with diverse mixed molassic and calcareous clayey soils including lighter patches of silt, (3) limestone plateaus with thin and heavy calcareous clayey soils. Rainfed cereals and sunflower dominate in surrounding hill slopes while irrigated maize dominates in alluvial plain. Irrigated agriculture is located mainly in the alluvial terraces, less on the hill slopes. The utilized agricultural area is about 40,000 ha with about 1,150 farms, of which 53% use irrigation (French Land Parcel Identification System 2009 dataset, see below). There are also numerous patches of fruit and high-income seed-production fields, which cover 8% and 17% of the irrigated area and, according to our estimation, are responsible for 13% and 27% of annual withdrawal volumes respectively.

1.2 Collaborative modelling of the socio-agro-hydrological system

The first step of the D&A methodology allowed to develop an integrated model of the SAH system through a structured process of mixing generic information and local knowledge (e.g. to complete the French Land Parcel Identification System – LPIS - and crop and hydrology models); see details in Murgue et al., 2014a). We organized the process of modelling the current situation around the three key domains of the SAH system: (1) agriculture i.e. the representation of the CS spatial distribution, (2) hydrology i.e. water resources location and dynamics and hydraulic infrastructure linking irrigated fields to water resources, and (3) water management i.e. dam management and uses restriction strategies.

Regarding the agriculture domain, we built a model of the agricultural landscape based on the French LPIS and on local knowledge about CS. It represents the spatial location and delineation of agricultural islets (a group of contiguous fields) and their affiliation to a farm territory. Also, for each field within the islets, it provides a 4 years crop sequence and a description of determinants of CS allocation in islets: rotation type, farm type, irrigation equipment, cultivar type (for details see Murgue et al. 2014a). This information has been integrated into a GIS and we conceptualised it as the structure of the agriculture domain model. Farm surveys allowed to elicit farmers’ crop management strategies (CMS) regarding tillage, sowing, irrigation, and harvest (see detail in section 1.4.2). Both farm surveys, expert knowledge and GIS’ data allowed us to allocate a CMS to each crop of the crop sequence of each of the 18,000 fields of the investigated landscape.

The dam management and withdrawal restrictions strategies were also modeled as sets of decision rules (e.g. intensity of water releases from dams is based on river flow at outlet and water level in dams).

1.3 Collaborative design of alternative socio-agro-hydrological systems

1.3.1 Co-design methodology

We briefly present here the co-design approach i.e. the second step of our D&A methodology (see details in Murgue et al. (2015) The design process was performed based on two main iterative sub-steps: (1) Revealing actors’ visions for change (“visioning” in Salter et al., 2010) during design workshops (2) Formalizing options for change in the laboratory. Although participants first proposed changes on the three domains of the SAH system (e.g. change water management strategies), due to lack of time, we asked them to elaborate on changes in CS spatial distribution which could reduce the risk of water management crises. For this, we led them to specify and quantify as precisely as possible the nature of changes (e.g. crop rotation, crop management practices) and their location (e.g. in which soil, farm type, pedoclimatic area), including farm level acceptability thresholds (e.g. which area in a farm can support changes). We then formalized the proposed changes into alternatives of CS spatial distribution using the model of the agricultural landscape developed in step 1 of the D&A methodology.

In this paper, we present the simulation and assessment of only two of the co-designed alternatives, chosen for being representative of two key stakes of the local water management challenge: to adequate the demand dynamics to the one of flow of the river Aveyron that can be supported by water releases from dams (Alternative 1) and to lower the irrigation level in small rivers that cannot be maintained by water releases (Alternative 2).

1.3.2 Alternative 1: Use early flowering cultivars, sown early (“AltPrec”)

This alternative corresponds to the replacement of the current late-flowering maize cultivars by early cultivars that would be sown about two weeks earlier than the current early cultivars. The stakeholders group specified that this is possible only in the “warmest soils”, i.e. the first to be warm enough for sowing after winter. Early flowering cultivars should achieve grain maturity earlier than the current late cultivars, hence lowering the withdrawal level towards the end of the low-flow period. This time of the year is often problematic because stored resources level is often low and State services, in charge of water governance, have to put high levels of withdrawal restrictions. However this option may induces downfalls for the farmers: mainly that early cultivars yield less. For this reason the agricultural group proposed to maximize the implementation of this alternative to 20% of the annual maize area for the farms concerned (acceptability threshold).

To implement this alternative in our simulation platform, we identified candidate areas by selecting fields whose observed crop sequence included maize and which were located in “alluvial” or “good *boulbène*” soil types. We then replaced the cultivar type of candidate fields up to 20 % of each farms’ annual maize areas based on the farms’ declared maize area in 2009. To test the impact potential of this alternative on the SAH system, we also tested it using 40, 60, 80 and 100% thresholds (AltPrec_{40%, 60%, 80%, 100%}). To figure early sowing, we changed the parameterization of the maize early cultivars sowing decision rule by opening it 20 days earlier (20th march instead of 10th of April; see Figure 29).

1.3.3 Alternative 2: limiting maize monocropping (“AltRot”)

This alternative, also proposed by the stakeholders group, aims at reducing the overall irrigation demand and so the global deficit in the watershed. The group proposed to replace maize monocropping practices by two years rotational practices with winter cereals like wheat. Farmers who participated in the design specified that (1) it would be economically acceptable if implemented only on 40% of farms’ maize monocropping area (therefore introducing 20% of winter cereals annually), (2) it is impossible in a specific soil type (“bad *boulbènes*”) because they are too hydromorphic during winter.

To implement this alternative, we replaced the sequence of candidate fields up to 40% of farms’ total maize monocropping area. For each of the impacted field, we also allocated a starting crop (i.e. either wheat or maize) so that in our simulation, half of the farms’ impacted area would start with maize and the other would start with a winter cereal. We also considered that wheat crops would be irrigated if necessary since farmers already have access to irrigation. To test the potential impact of this alternative, we also implemented it using 40, 60, 80 and 100% thresholds (AltRot_{40%, 60%, 80%, 100%}) and experienced a second modality for all these thresholds, inspired from the stakeholders group’s proposal described below: to replace maize monocropping by maize cropped every three years (hereafter called AltRot). For this modality again, we updated the crop sequences making sure that 1/3rd of farms’ impacted area would start with maize and 2/3rd would start with winter cereal.

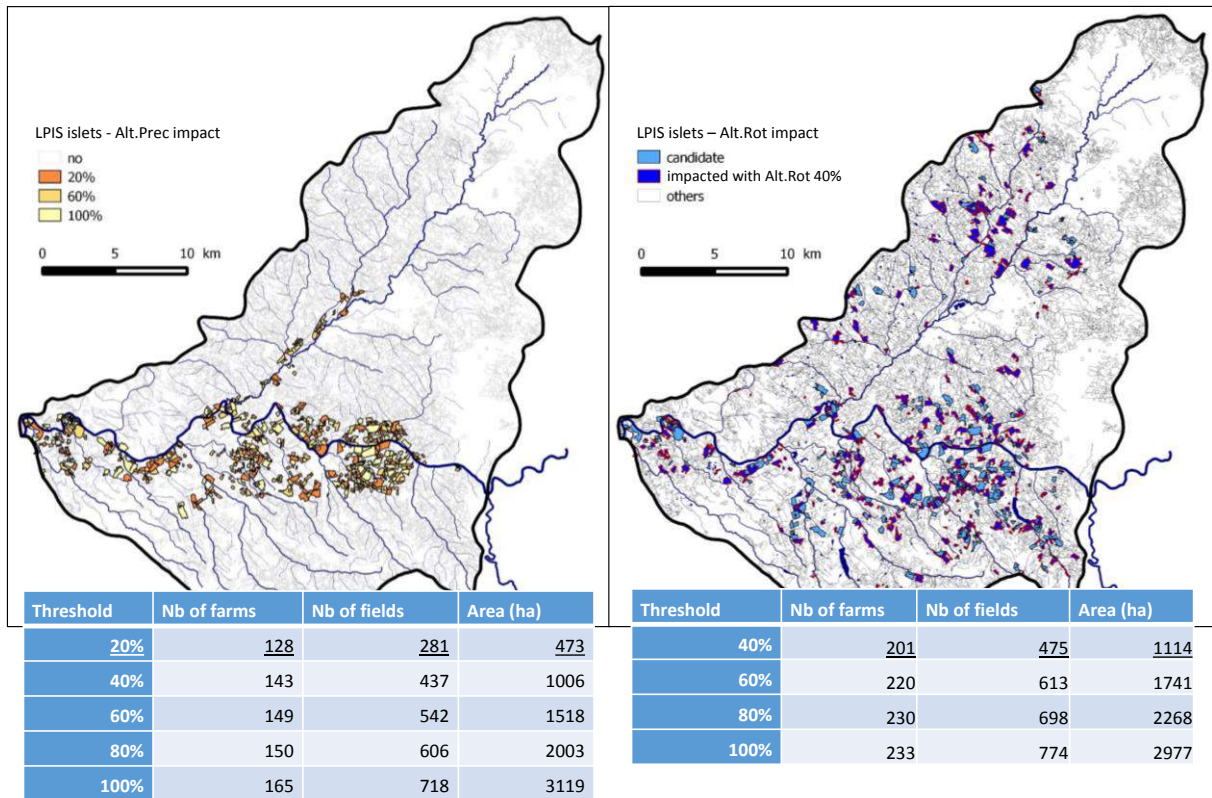


Figure 29: Maps of candidate and impacted fields for AltPrec and AltRot. The tables show the corresponding quantification of each alternative’s impact in the agricultural landscape for the different thresholds we tested (a percentage of candidate farms’ annual maize area). We respected fields’ current delineation to select impacted fields, which means we did not select the fields if their area was higher than the given threshold. This is why the impacted area of AltPrec_{20%} is less that 0.2 x 3,119 ha.

1.4 The MAELIA multi-agent platform

1.4.1 Overview

To assess effects of the alternatives on the SAH system with spatial and dynamic insight, we instantiated the multi-agent MAELIA platform (Therond et al., 2014). This platform was designed to model SES to deal with water resource management issues, in France. It allows simulating the key interactions between and within the organizational levels of: (1) The agricultural domain in a fully distributed manner: all fields, farm territories, (2) The hydrology domain simulated through the formalisms of the SWAT model, (3) The water management domain: withdrawal restrictions and water release practices, hereafter called the normative module. Instantiating MAELIA required to formalize all needed inputs, including the spatial distribution of cropping systems, hydrology, soil and climatic datasets. We also needed to parameterize the virtual farmers and water management agents’ decision rules, and the hydrological module (see below).

		Entities and dynamics	Data and knowledge sources
Processes (daily step - MAM)	Agriculture	<ul style="list-style-type: none"> - Farmer practices (decision rules): tillage, sowing, irrigation, harvest - Plant growth and water dynamics (semi-empirical models) 	<ul style="list-style-type: none"> - Farm surveys to describe in detail decision rules of crop management - AqYield crop model
	Normative	<ul style="list-style-type: none"> - Water withdrawal restrictions (3 levels) - Water releases from upstream collective dams 	<ul style="list-style-type: none"> - Specific surveys to elicit state services' decision rules to set water withdrawal restrictions and releases from stored water resources - Water release and restriction records
	Hydrology	<ul style="list-style-type: none"> - Flows of main streams at sub-watershed outlets - Interaction between rivers and alluvial groundwater - Filling/drying of water bodies 	<ul style="list-style-type: none"> - Hydrology datasets for input and outputs of the Aveyron river (daily average flow) - SWAT model⁵ to simulate hydrology
Structure (GIS)	Agriculture	<ul style="list-style-type: none"> - Spatial distribution of cropping systems (sequences + crop management strategies) in all fields of the agricultural landscape - Farm types (irrigability, animal production, feeding system: silage vs. pasture, crop distribution) - Zones of seed production 	<ul style="list-style-type: none"> - 2006-2009 LPIS²⁰ - CORINE Land Cover 2006 (version 12/2009) - Actors, agricultural experts and farmers of the case study - Local irrigation experts
		<ul style="list-style-type: none"> - Soil units (8 types) 	<ul style="list-style-type: none"> - Soil map (1/500,000)²¹ - PBRM workshop, participatory GIS methods²²
	Governance	<ul style="list-style-type: none"> - Hydraulic linkages between islets and water resources via withdrawal points - Irrigation networks of water user associations 	<ul style="list-style-type: none"> - Local geo-data from state services - Maps from water user associations
		<ul style="list-style-type: none"> - Restriction zones: Administrative zones and sectors - Low flow measurement at hydrological nodal points 	<ul style="list-style-type: none"> - Local geographical data from state services - Water agency
Hydrology	<ul style="list-style-type: none"> - Elementary hydrological (watershed) units "sub-watersheds" - Water resources: water bodies, rivers, alluvial groundwater 	<ul style="list-style-type: none"> - National water resources database (DB Carthage®) - Local actors and experts - Local database on alluvial groundwater²³ 	

Table 6: summary of all structural and dynamic elements included in our instantiation of the MAELIA platform

Table 6 synthesizes all structural and dynamic elements included in our instantiation, briefly presenting the sources of information we used. We note the importance of the 2006-2009 LPIS dataset to provide the spatial structure of the agricultural landscape, and information on annual crop areas. Our main objective was to retrace the patterns of irrigation water withdrawals which emerge from interactions between the hydrological,

²⁰ Land Parcel Identification System (see Inan et al., 2010)

²¹ Regional agriculture advisory services (CRAMP) www.mp.chambagri.fr/Les-sols-du-Tarn-et-Garonne.html

²² participatory GIS: see Abbot, Chambers, & Dunn, 1998; Perception Base Regional Mapping, see Saqalli, Caron, Defourny, & Issaka, 2009)

²³ Gandolfi (1997)

agricultural and water management domains rather than to represent mechanistic processes exhaustively ("pattern oriented modelling" in Grimm & Railsback, 2012).

In our description of the platform, we focus on the agricultural modules because they are impacted by the alternative agricultural landscape used as inputs. Hydrology and normative modules are presented shortly (for more details see Gaudou et al., 2013 and Mayor et al., 2012). All these modules interact at different levels and at daily time steps, resulting in much intertwined processes. For example, crop water requirement determine farmer decision and thus water withdrawals for irrigation, which impact river flows and so also guides the decisions for water releases and/or withdrawal restrictions. In return, the resulting hydrology determines water available for irrigation and so farmers' capacity to irrigate and therefore crop growth.

1.4.2 The agricultural modules

The agricultural modules in MAELIA simulate the spatial and temporal dynamics of agricultural activities in interaction with the hydrological and normative modules. For clarity, we present the agricultural module as 2 interacting components (i) crop growth and soil water dynamics, (ii) farmer agents' decision making for implementing crop management technical operations and irrigation.

Crop growth: the AqYield model

In MAELIA, the crop model *AqYield* simulates plant growth, soil water dynamics and crop yield in each field. It has been developed to be used in participatory researches (i.e., in interaction with stakeholders) to assess performances of alternative cropping systems in south-western France. Its equations are detailed by (Constantin et al. 2015; Murgue et al., 2014c). *AqYield* is overall simple: with few equations/processes and low input data requirements, and accurate enough for our purpose: simulating crop growth and daily soil water balance in response to climate and farmers practices.

Crop development is estimated using the accumulation of mean daily effective temperature. A scale of crop phenology allows to characterize and monitor key development stages from sowing to harvest; a crop coefficient (Kc) indicates crop transpiration potential; the soil water content (WC) available for crop absorption increases along with the crop phenology to figure root development. There is no biomass estimation, yield is estimated based on a potential yield (a parameter) that is revised according to a yield gap. This gap is calculated at harvest through a non-linear production function using an index of annual water requirement satisfaction as input. The soil is represented with a nested reservoirs approach: surface, tillage, roots and maximum soil depth. The WC levels vary from wilting point (0%) to field capacity (100%) and are calculated every day by balancing inputs (irrigation, rainfall) and outputs (transpiration, evaporation, drainage, and runoff). *AqYield* allows to figure the effect of tillage practices on evaporation dynamics, and represents capillarity fluxes between deep and surface reservoirs.

In *AqYield*, crops are parameterized by cultivars (e.g. flowering precocity for maize). Hence we refer to crop/cultivar to define a unique crop parameterization in the model. 17 crop/cultivar were parameterized, including 12 species which cover 100% of the irrigated areas: sunflower, wheat, barley, peas, rapeseed, sorghum, soya, temporary and permanent meadows, apple, plum, and maize. Maize being the most intensively irrigated specie locally, it is considered under 8 crop/cultivars: 1 for seed, 1 for forage and 6 for grain production ranging in 6 earliness categories: very late (VL), late (L), semi Late (SL), semi-early (SE), early (E), very early (VE). *AqYield* provides soil and plant indicators to the farmer agents described in the following section, and hydrological information (field' drainage / runoff) to the MAELIA hydrological module.

Farmer decisions: cropping and irrigation practices

The main farmer agents' decision making process is specified by the crop management strategy for each crop of each crop rotation affected to each field (in current and alternatives of CS spatial distribution). CMS are coded as a set of decision rules (DRs) using the typical syntax: "IF INDICATOR OPERATOR THRESHOLD AND INDICATOR OPERATOR [...] THEN ACTION (ELSE ACTION)". Such a set of DRs should be seen as a pre-established strategy that defines the conditions to trigger various sequences of technical operations depending on soil-plant-climate-water resources conditions at field level. There are about 30 individual rules per CMS (for up to 8 technical operations) and 142 CMS (Murgue al., 2014c). In order to represent farmers' aversion to fail at carrying out a technical operation, the model's DRs Architecture allows to release the constraining threshold along a time or physiological window. For example in a CS based on maize/wheat annual rotation, to implement maize harvest, the constraint on soil water content becomes very low as the wheat sowing time window comes to an end. Farmer agents carry out technical operations every day according to their execution time (ha/hr) and to the fields' spatial distribution in their farm territory as to minimize distance when changing field. In addition, farmer agents manage concurrence between technical operations considering pre-defined priority.

To simulate the daily dynamics of water withdrawals of each farm, we needed to represent the farms' irrigation blocks. Those spatial management units, defined every years by farmer agents, correspond to the area irrigated with a given irrigation equipment for a given irrigated CMS. The size of irrigation blocks depend on the area that the equipment can irrigate per day and the irrigation turn delay (ITD) i.e. the number of days between each water delivery in a given field. ITD are defined in CMS. According to the maximum size of irrigation block for a given ITD and the area of each irrigated CMS there may be one or several irrigation blocks in a given farm. This representation allows regularity of the daily water withdrawals and of the time needed to irrigate concerned areas of the farms.

At field level, farmer agents also takes into account the priority of use of the potential different water resources, day after day, according their filling state and priority. Farm surveys showed that farmers prioritize resource types as follows (1) collective network, (2) river, (3) aquifer, (4) private dams. In our model, farmers start with the most priority resource and if it turns either dry or normatively restricted, farmers tap in the following less priority one.

1.4.3 The Hydrological and normative modules

Hydrology

The hydrological module in MAELIA uses the formalisms of the SWAT model (Arnold and Srinivasan, 1998; <http://swat.tamu.edu/>) to simulate hydrological fluxes within the watershed. The model is semi-distributed, simulating hydrology at sub-watershed level (12 in total, 70 km² in average). These latter are subdivided into non-spatialized Hydrologic Response Units (HRUs) representing a unique combination of land cover, soil type and slope. In MAELIA the SWAT equations were recoded for both, (i) the "land phase" of the hydrologic cycle that controls the water loads to the main channel of each sub-watersheds (snowmelt, runoff, infiltration, redistribution in soil profile, evapotranspiration for non-crop plants, lateral subsurface flow and percolation into shallow and deep aquifers) and (ii) the "routing phase" of the hydrologic cycle that controls the water flows to the outlet of the watershed through the channel network (water routing through the channel, transfers from and to the shallow aquifer, evaporation). Runoff, drainage and evapotranspiration over the agricultural fields is calculated by *AqYield* and aggregated at sub-watershed level and fed to the land phase.

Also in the hydrological modules, all water resources available for irrigation are spatialized explicitly (rivers, ground water entities and both collective and private dams), interacting with hydrological fluxes of the land and routing phases. Furthermore each agricultural islets is linked to one or several water resources through hydraulic

connexions. These latter were estimated according to local database on withdrawal points (pumps) and hydraulic network (pipes) and GIS spatial treatments based on proximity rules.

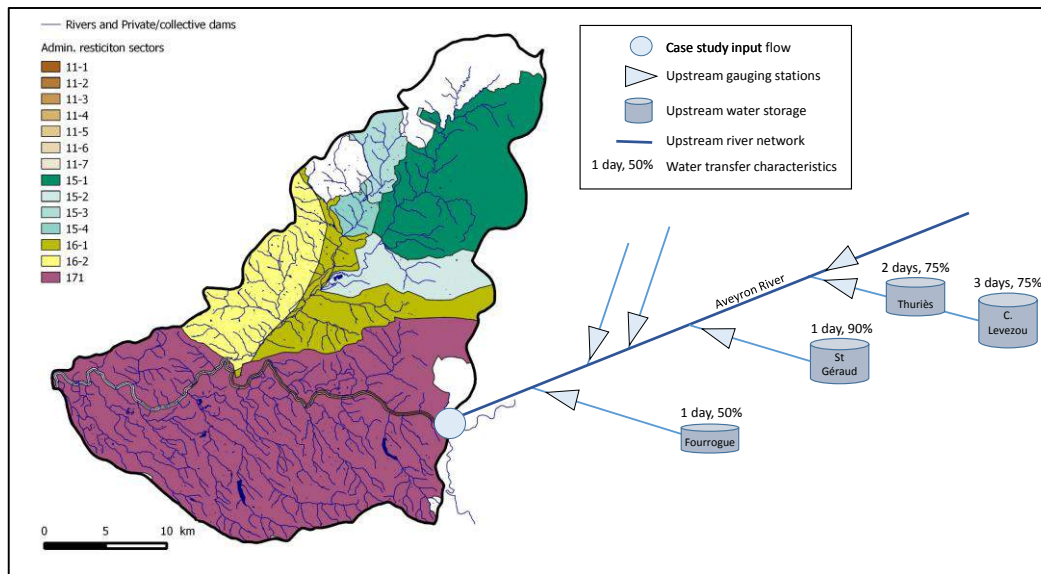


Figure 30: illustration of the spatial representations for the normative and hydrological modules. The map shows the “drought sectors” used for withdrawal restrictions

In our instantiation of the platform, because we focus on the downstream of a watershed, the incoming_river flow (Aveyron River) is forced into the model. The daily variables used as inputs were estimated by summing daily stream flows measured at upstream gauging stations (Figure 30) and deducting estimated water releases flows from upstream dams.

Normative aspects

The normative module uses generic formalisms available in the MAELIA platform, coded as decision rules, to simulate local state services’ practices in ordering water releases from upstream collective dams and issuing withdrawal restrictions (Mazzege et al., 2014). These decision rules were parameterized locally by eliciting state services agents’ current practices. For dam water releases, the formalisms allow to take into account both dams’ position on the hydrological network and their day-to-day fill level. For withdrawal restrictions, the decision rules consider flow levels at hydrological nodal points and upstream dams’ fill level, and may result in 3 levels of restriction intensity (1, 3 or 7 days a week). Restriction decisions are taken once every week only. They are applied to one or several pre-defined “drought zones” themselves divided in “drought sectors” and prohibit agricultural withdrawals based on a number of days per week. For partial restrictions (e.g. two days a week), the prohibition moves from one or several sectors to another or others in the drought zone, day after day during the week according the level of restriction intensity. For example, for the first restriction level, 1 day a week, withdrawal prohibition turns from one sector to another each day of the week. We integrate an explicit spatialisation of restriction sectors and the location of dams on the basin’s hydrological network (Figure 30).

1.5 Calibration, Validation of and Simulation with the MAELIA platform

1.5.1 Overall calibration-validation approach

The calibration and evaluation of the MAELIA platform is a scientific challenge because the simulated processes are diverse and interweaving (interacting within and between levels) (Lardy et al., 2014). To apprehend this complexity we chose to calibrate and evaluate the different modules step by step. Quantitative observed data was scarce in comparison to the platform’s simulation potential, especially in terms of spatial resolutions.

Accordingly, as suggested by (Bergez et al., 2010) for assessing integrated modeling tools, we articulated quantitative and qualitative approaches for our evaluation. We asked local agricultural and hydrology experts and local state services for water releases and restrictions to evaluate the current situation simulation outputs.

1.5.2 Calibration of the MAELIA' modules

Crop and soil parameters for AqYield were available from previous local studies which used the model for field irrigation monitoring (Constantin et al., 2015), thus no calibration or validation was run at field level for this module except for the introduction of the 7 maize cultivars. The cultivars' parameterization was calibrated using local field level simulations, with the objective of matching experimentation data on Kc dynamics made available by a local agricultural extension service.

CMS were calibrated to match field observations of farmer practices. For this we iteratively ran simulations and adapted the parameterization of the thresholds of decision rules, checking for coherence of the simulation outputs at various levels (e.g. field, farm, CMS per soil types) to information collected on crop management in the farm survey. Special attention was put on the temporality of simulated technical operations (e.g. *is the average date for starting irrigation is coherent for this soil type? Is the annual dosage coherent for the soybean production on this farm?*).

The calibration process of the hydrological module was similar to the one presented in detail by (Lardy et al., 2014). Classically it was based on comparison of simulations outputs using a set of parameter values with observed daily data of the river flow of the two main rivers of the area. It was done with the agricultural modules activated figuring the interactions between hydrology and irrigation withdrawals as observed data also resulted from these interactions.

The parameterization of the DRs of water releases and uses restrictions was done by activating all other modules of the platform and iteratively hand calibrating the threshold for dam releases. This calibration was based on local State Services releases records, available only for the years 2008-2010, making sure that simulated and recorded annual released volumes were coherent. For restrictions, we ran a qualitative evaluation based on the available records, checking that the number of restriction days were coherent in our simulations.

1.5.3 Evaluation of the MAELIA platform

We evaluated our model's capacity to predict the SAH system behaviour in the current situation. For this we activated all modules of the platform as figure the interactions between the hydrological, agricultural and normative processes. We ran simulations using observed climatic data (2001-2010) and the agricultural landscape model of the current situation (CurSit) as input. We then organized a workshop with local agricultural and water management experts and focused on key combinations of variables and spatiotemporal scales that are representative of the model's outputs: annual volumes withdrawn, timing of simulated irrigation per CMS, intra-annual daily irrigation demand, and simulated stream flow for the main rivers. We provided local experts with comparative information when available, mainly the regional Water Agency estimation of annual withdrawal levels, and daily measurements of the river flows at river basin outlet.

1.5.4 Simulations

In this paper we present the simulation outputs of different configurations of the SAH system varying only in terms of CS spatial distribution: the current situation (CurSit) and 5 declinations of AltPrec (AltPrec_{20%}, 40%, 60%, 80%, 100%) and 4 of AltRot (AltRot_{40%}, 60%, 80%, 100%) that is, 10 simulations overall. We ran MAELIA on a 10 years climatic series (2001-2010), available for 20 of a 8 X 8 km grid points dispersed over the agricultural landscape and tagged to the fields, watershed etc. according proximity rules. The simulation outputs were aggregated at different organizational levels (field, farm, sub-watershed, restriction areas) and parametric aggregates (e.g. field with

homogeneity of specie, CMS, rotation type). Outputs such as labor time, yield or withdrawal levels can be provided for all individual entities of each level and the aggregation levels.

2 Results

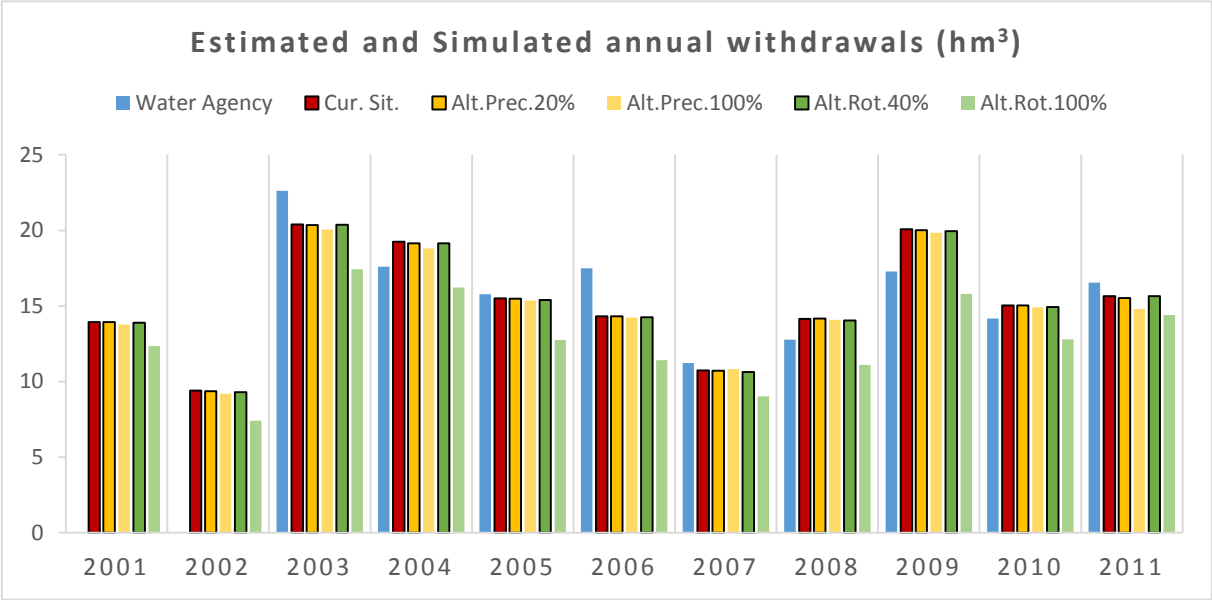


Figure 31: Estimated annual withdrawal volumes (“Water Agency”), and simulated equivalents for the current situation, AltPrec, and AltRot. AltPrec induces earlier sowing and cultivars, AltRot changes the monocropping to maize/cereals rotation practices. We also include the simulated volumes for the highest thresholds of both alternatives.

2.1 Evaluation of the simulation platform

Outcomes of the participatory qualitative assessment, shown that our instantiation of the MAELIA platform allows to figure the current situation’s inter-annual and intra-seasonal withdrawal dynamics at all investigated spatiotemporal scales from field and farm to watershed and other spatial aggregates. For details on this assessment, see Murgue et al. (2014c). Notably, the expert group compared simulation outputs with the data from the regional Water Agency and concluded that the simulations are satisfactory (Figure 31, comparison between water agency data and the simulated current situation). The group also validated simulated dynamics for crop management (e.g. sowing dates, last irrigation dates) and the intra seasonal withdrawal dynamics at different organisational and spatial aggregation levels.

Concerning the simulation of hydrology, we observed that the platform well figures patterns of the observed flow dynamic during the low-flow season (for example see Figure 32). Nonetheless although simulated dam water releases and restriction days are quite coherent in patterns, they do not match with observed data. Off course this has a potential strong impact on the daily simulated river flow. This is due to the fact that although originally well specified by local services through the official decision rules, the decisional process of releasing dam water and setting withdrawal restrictions is in fact the result of a multi stakeholder negotiation process where “the negotiation ingredients may include the conflict development among stakeholders, breaches of discussions, the game of political influences, issue linking (...), electoral considerations, preservation of the social peace, etc.” (Mazzega et al., 2014).

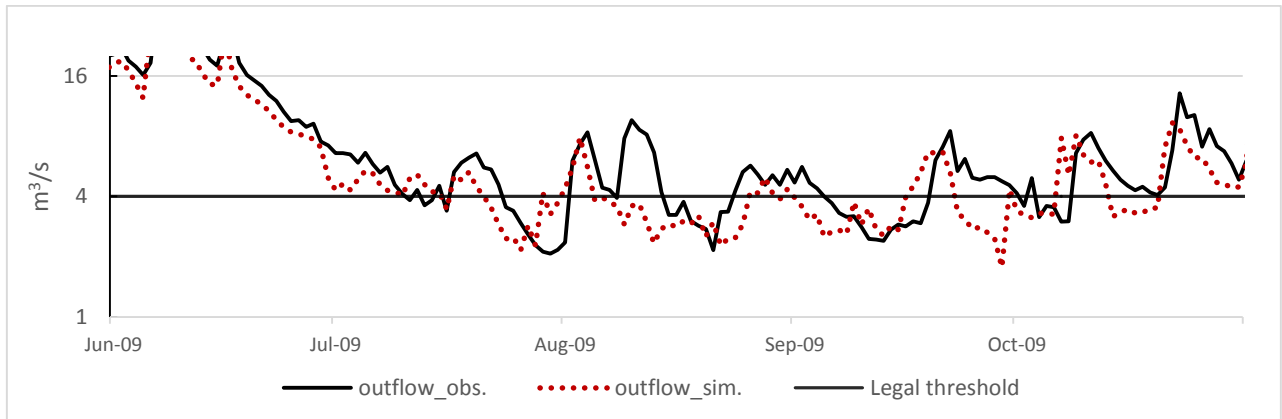


Figure 32: Simulated (*outflow_sim*) and observed (*outflow_obs*) flows at Aveyron River watershed outlet. Example for 2009, logarithmic scale (base 4)

This common difficulty or even impossibility of figuring social negotiation processes, doesn't mean that we cannot use the platform to assess alternatives designed by local actors but rather that simulation outputs have to be cautiously interpreted. As explained by Mazzega et al. (2014) and classically done in scenario exercises (Therond et al., 2009), although simulation of alternatives impacts cannot be compared to observed data, the comparisons of simulation outputs allow to assess potential relative impacts of the different simulated situations (here the simulated current situation and simulated alternatives).

2.2 Can the alternative on early sowing and cultivar precocity reduce end-season withdrawals?

The implementation of AltPrec_{20%} resulted in changing maize cropping practices in 473 ha, which is only about 15% of maize area (3119 ha). The impact of this alternative on the day-to-day withdrawal level in the Aveyron River is significant not only, as expected, at the end of the irrigation season but also towards the beginning (see AltPrec, AltPrec_{60%} and AltPrec_{100%} in Figure 33).

In average for the 10 years of simulation, AltPrec_{20%} and AltPrec_{100%} reduce the total withdrawal level of about 10% and 50% respectively between the 15-sept and 15-oct (Figure 33). This impact is stronger for years with extremely dry warm springs, like the year 2003, because sowing conditions are met early in the year and maize early cultivars reach maturity much quicker. Yet, when the month of September is rainy, this alternative does not change the withdrawal dynamics because irrigation is set off early. Figure 33b shows that the change in maize cultivars and sowing practices can raise the total daily withdrawal level of about 10% to 30% on some days at the beginning of the season in average. This is due to a faster development of early cultivars after the 15 leaves physiological stage, which results in an early flowering and thus an early peak for their irrigation needs. Again if the spring is warm and hot, the raise in total irrigation demand may be even more important, as up to 50% to 100% in 2005 (Figure 33). We note however that this change is very short in time (only a few days) in comparison with the fact that AltPrec reduces the water withdrawals on several weeks in the late season.

On the impacted fields, the AltPrec lowers the average simulated irrigation level of about 42 mm, which is about 15% of the total amount.

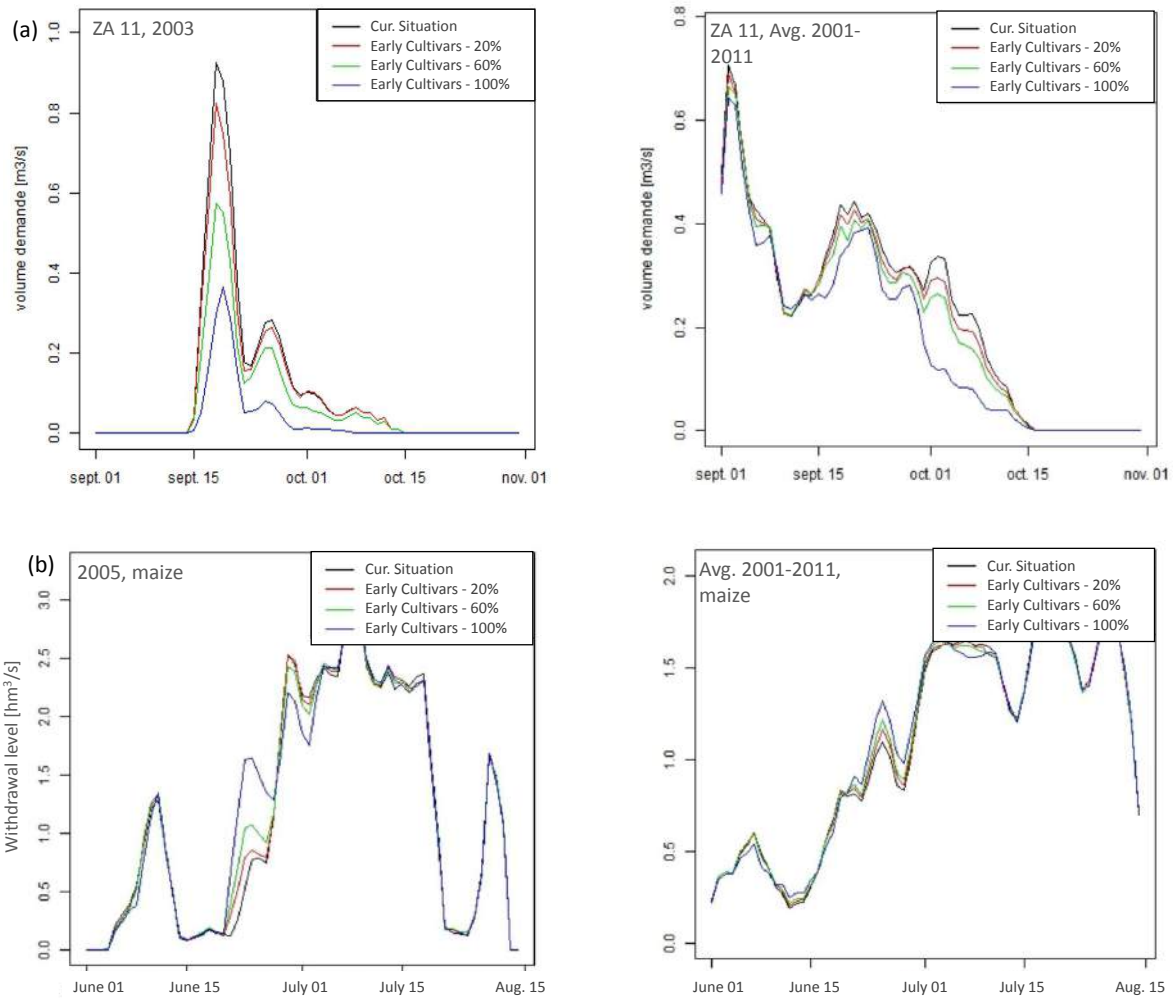
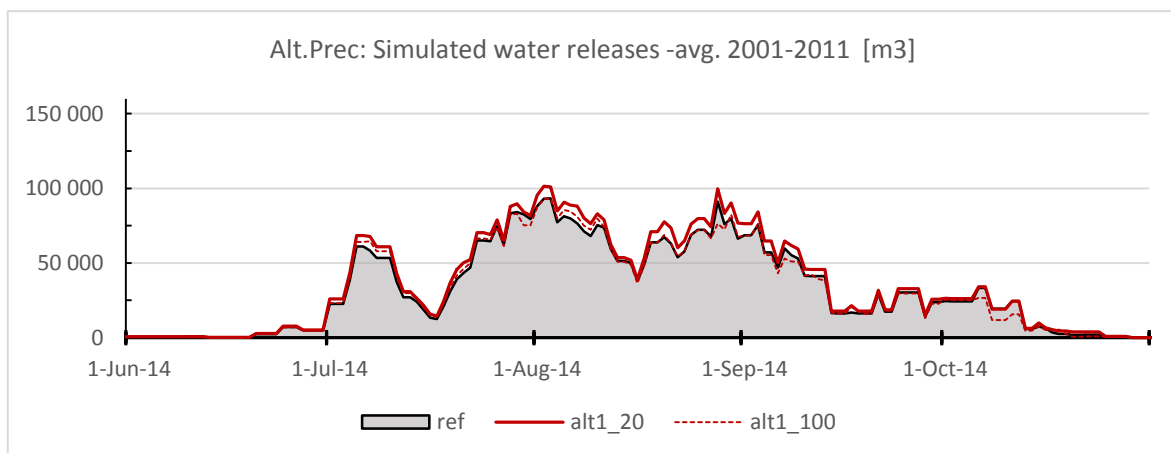


Figure 33: Simulated withdrawal dynamics on ZA 11 (Aveyron River) for the current situation and AltPrec. (a) Focuses on end summer dynamics while (b) focuses on the beginning of the season. For each period, we provide the average withdrawal level over the 10 years simulation and the example of an extreme year.

However the annual impact of Alt_{20%} at watershed level is not significant: it reduces the total annual withdrawals from the Aveyron River by 0.23% in average (about 35,000m³), and AltPrec_{100%} by 3.51%! This is not surprising when taking into consideration that grain maize represent only 40% of irrigation volumes and that the alternative potentially impacts only end-season withdrawals.



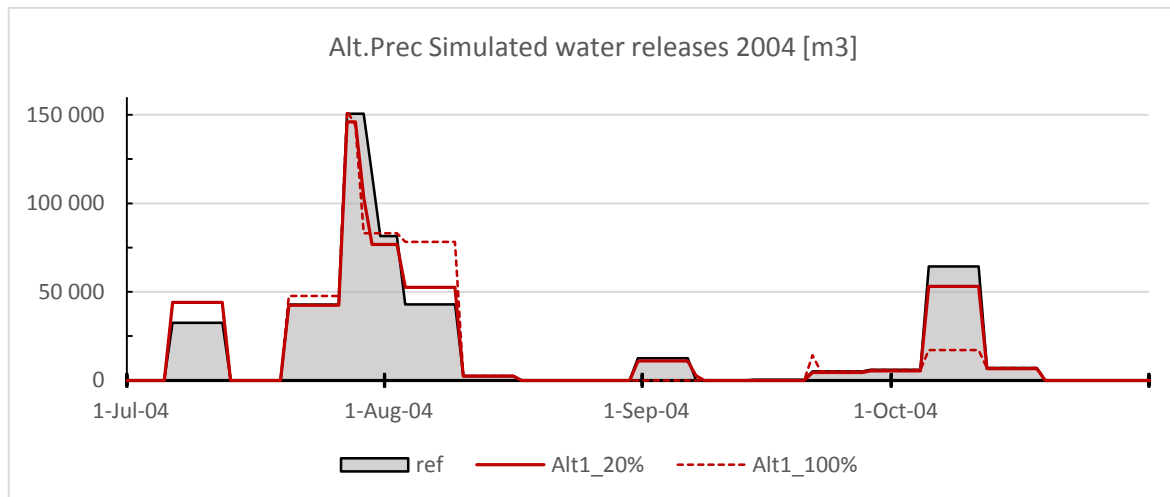


Figure 34: diagrams of the simulated released volumes in for current situation and AltPrec. (a) Shows the average, (b) shows the example of year 2004.

Concerning the effects of AltPrec on water releases, Figure 34a shows that in average, the normative module releases more water from upstream dams along the low-flow season than it does in the current situation. This is due to the increase of early withdrawals which leads to earlier edaphic and hydrologic droughts and thus an earlier need for water releases. In line with this, the simulation for the year 2004 (Figure 34b) shows that a significant amount of stored water is saved in October, but that unexpectedly, more water is released within the month of July and August. This offset may be due to a cumulative effect from early withdrawal demand.

2.3 Does the maize-cereal rotation alternative reduce the Aveyron River basin's deficit?

The implementation of AltRot, bearing that maximum 40% of farms' annual maize monocropping area can be impacted, resulted in changing maize rotation practices in 1,114 ha, which is about 37% of the candidate area (2,977 ha). AltRot only allows for an average 4.2% reduction of annual withdrawals on the watershed (0.6 hm³). For the years 2003 and 2009 (the 2 driest summers in our 10 years climatic series), the change triggers a reduction of about 0.8 and 1.0 hm³, respectively 11% and 14% of the estimated water deficit of the basin.

As expected AltRot_{100%} (change monocropping for maize/wheat rotations in *all* candidate areas) has a more significant impact: in 2003 and 2009 it allows for a reduction of 1.9 and 2.7 hm³, respectively 27% and 39%, of the estimated water deficit.

Analyses of the irrigation demand dynamics at different organisation level arise some unexpected results of AltRot_{100%}. First of all, the irrigation demand with AltRot_{100%} is similar to the current situation at the beginning of the season (mid to end of May), and even higher in driest years. This is linked to the fact that fields where wheat replaces maize are irrigated when necessary and that this irrigation of wheat takes place at this period.

At field level, replacing maize crops by wheat saves irrigation water systematically, but also induces less drainage and runoff. For example in a sample field in 2006, simulation of wheat cropping allowed to reduce irrigation water of 135 mm but also induced less drainage (-99 mm) and less runoff (-11 mm), as well as a lower average soil moisture over the year (-20 mm) in comparison to maize cropping. These shortages of drainage and runoff reduce the flows of water from the field to the surrounding rivers.

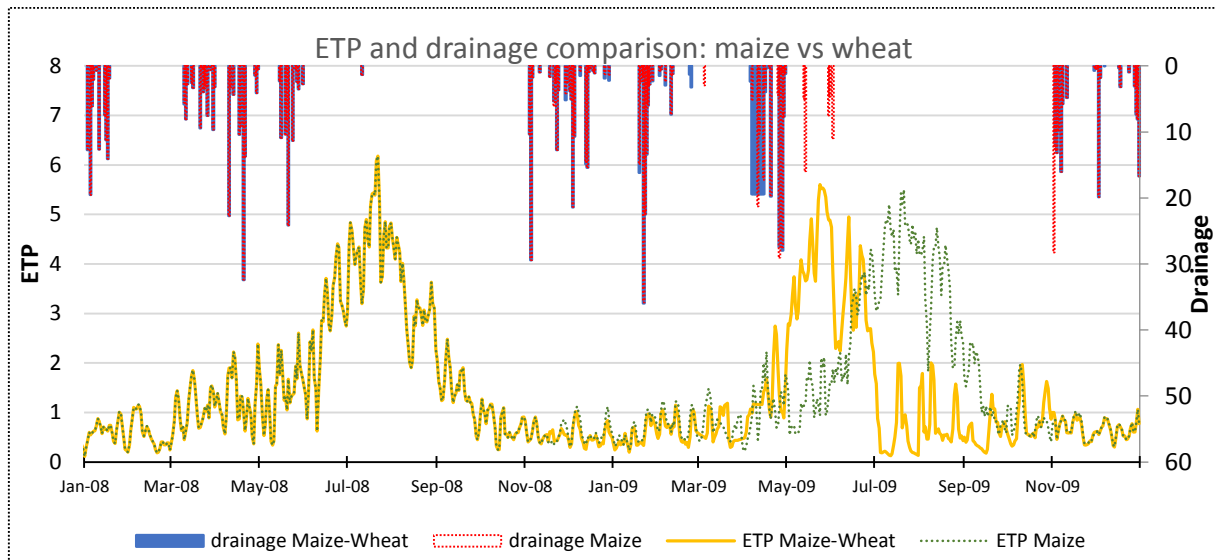


Figure 35: Comparison of water balance dynamics of wheat and maize cropping in one of the impacted fields for AltRot (Jan-08 to Dec-09), estimated by the AqYield crop-soil model. In 2009 the drainage level is higher with maize cropping at the beginning of the low flow season (May-June), due to dryer soils under wheat because of early evapotranspiration. In November, the first drainage event is higher with maize due to moister soils with irrigation. In summer after wheat harvest, the evaporation level of wheat fields is high (1 – 2 mm/day).

With wheat cropping, because evapotranspiration is already high in spring (higher by 99 mm between April and May), the soil moisture level is low when the last significant spring rainfalls occurs in the month of May. As a result with a wheat cover, spring rainfalls almost entirely infiltrate in the soil and are transpired during the month of May and June. Conversely in a maize field the soil is kept moist with later development of the crop, and those rainfalls are drained to the aquifers or run-off to the adjacent water bodies (Figure 8). Also at the end of the season with wheat cropping, the soil moisture level is quite low due to high evaporation during the month of August and September since local farmer do not use cover crops and till late summer. As a consequence the first rainfalls have to fill up the soil water capacity before they can reach adjacent water bodies. On the contrary, because maize is intensively irrigated during low flow season the soil is kept moist, and so the first rainfalls are drained or runoff to adjacent water bodies.

Looking at the outputs of our simulations at watershed and sub-watershed level, we found that changing AltRot has different effects on stream flow according to the sub-watershed. Our simulations showed that AltRot tends to rise flow levels of the Aveyron River, quite significantly with AltRot_{100%}. However AltRot variably rises and lowers flow levels of the *Lère* River, along the season, and has a tendency to delay the return of normal flow levels (Figure 9).

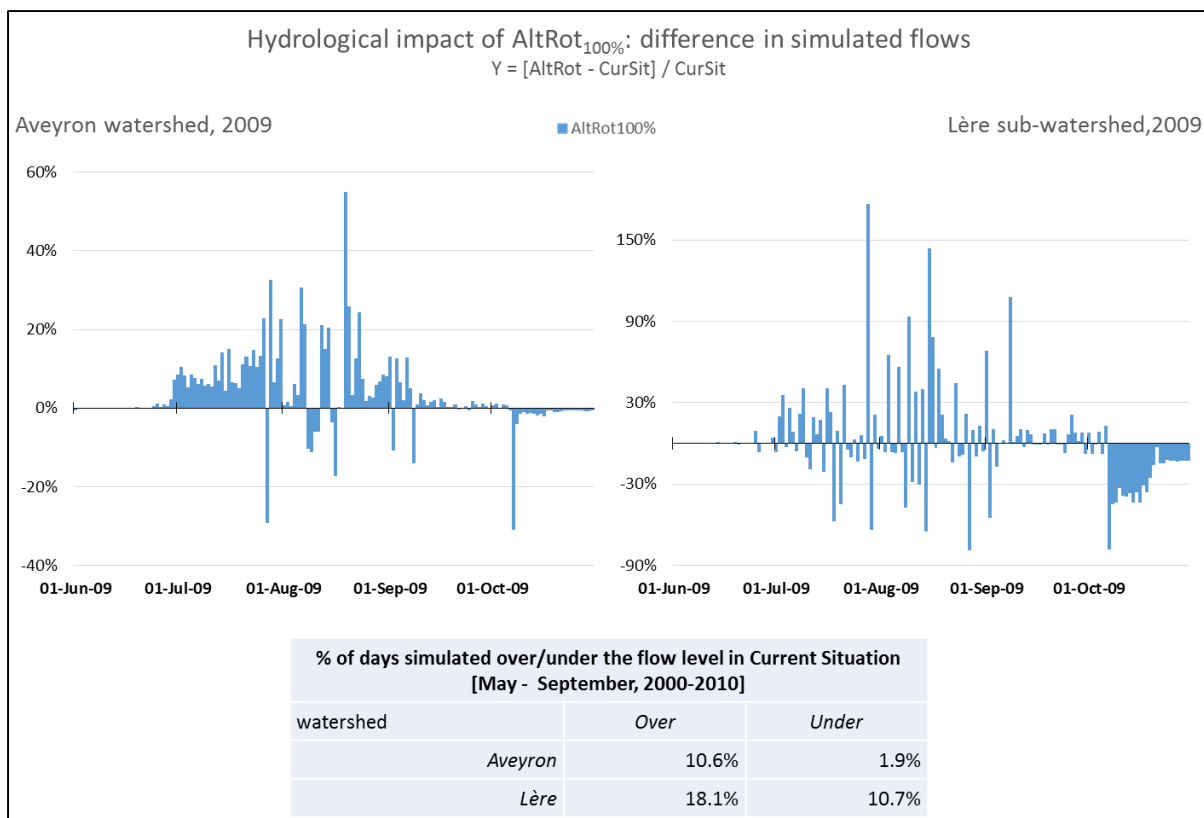


Figure 36: difference (in %) of simulated outflows between AltRot_{100%} and current situation in comparison to this latter [(AltRot - CurSit)/CurSit] for the Aveyron river and the Lère river. AltRot significantly rises the flow level during the low flow season. However for the Lère sub-watershed, the impact is variably positive and negative, however continuously negative towards the end of the season (Oct-Nov)

This simulated difference is due to the different natures of water resources used for irrigation in the Lère and in the Aveyron sub-watersheds. In the former, farmers use a majority of water resources that are disconnected from the streams (private dams and aquifers), whereas in the Aveyron most of the irrigation water is withdrawn directly from the river, especially through large hydraulic networks. Therefore in the Lère, drainage and runoff due to irrigation provide river with additional water while in the Aveyron watershed drainage and runoff are just a part of the water previously withdrawn in the river.

Another major observation to make is the continuous reduction of the river flow at the end of the season, especially intense in the Lère watershed. This means that the first rainfall events at the end of the low flow season are not as efficient in rising the stream flow as they are in CurSit. We hypothesise that this is because as explained above in August and September, soils are drier in wheat cropping than in maize cropping where irrigation keep them moist. In the case of the Lère watershed, this phenomenon is more observable because the flow at outlet only depends on the watershed hydrology. The Aveyron river flow is strongly determine by the upstream hydrology.

3 Discussion

3.1 Are the mainstream proposals generic solutions?

The two alternative we present are much contrasted: while At.Rot_{100%} aims at decreasing the overall annual irrigation volume, AltPrec is rather time specific, aiming at solving a recurring issue in situations that are not risky most of the time (recharged).

In the Adour Garonne area in southwestern France, there are two mainstream proposals for reducing the risk to cross low-flow legal thresholds in water deficit areas. One is the so-called “dodging strategy” (i.e. move the maize development cycle earlier in the season to spread the peak in irrigation demand), the other is to reduce the amount of maize cropping to reduce the risk of hydrological droughts in non-recharged areas. We chose the alternatives above to discuss whether these mainstream proposals do have this potential according to our model. The two alternatives we present in this paper are in fact similar to those proposals: in a way the co-design process allowed to specify how they could be implemented taking into account the Aveyron River basin specificities. Looking at the simulation results presented in this paper, one should say that their potential is very limited, at least considering the acceptability thresholds proposed by the agricultural stakeholders we worked with.

AltPrec, similar to the “dodging” strategy can reduce the end season demand significantly for years with dry end summers. However the early season demand may also be raised, especially in the case of warm and dry springs and early summers. In our simulations, this phenomenon induces a raise in water releases not just at the beginning but all along the low flow season due to stronger simulated edaphic and in turn hydrological droughts. This effect is quite unexpected and may retrace a real world possibility which would then be an important downfall for the implementation of AltPrec in the area. This type of alternative would be well adapted for places where the dam water can be released early as statistically the end of summer is quite humid. In the case of the downstream Aveyron area, the end of summer is often dry and the upstream dam water needs to be saved. Moreover in the area, the historically lowest flow levels were measured at this time of the year (September) during the years 2000 and had to be supported with important water releases.

Simulations of AltRot showed that the impact on irrigation withdrawal may be interesting by lowering them if the acceptability threshold is high. However the effect on stream flow may not be only positive. We point out that for non-recharged rivers in upstream areas, where the water flows are directly linked to drainage and runoff in agricultural fields, there is a potential trade-off between this positive impact and a reduction of the river flows at the beginning and end of the season. The alternative has the potential to induce an early start for crises situations, and to extend of the crisis situation later in the year.

In addition, based on the diversity of situation in our case study, we point out that this change in irrigation demand raises stream flow levels significantly only in areas where farmers only have access to direct river withdrawals. In many situations though, farmers access a diversity of water resources (e.g. private dams, wells) that may be disconnected from the river flows and so the change in irrigation demand does not impact the river flows. Although it is commonly accepted that less irrigated maize may allow a rise in stream flow levels, our simulations have shown that this is not that simple for all situations, years and over the low-flow period. Current irrigation practices, that have tendency to over irrigate, are potentially beneficial to the stream flow level when irrigation water is abstracted from other resources than the river potentially in deficit. However, for situations where withdrawals are mainly carried out in streams, the overall impact of reducing the area of irrigated maize is quite positive with higher flow levels along summer. However in all situations, changing from maize to wheat may lower the flow level at the beginning and delay the return to normal at the end of the low-flow season, which are both critical times for aquatic ecosystems. With this point, we do not mean that wheat cropping is more harmful to the aquatic environments, but we wish to show that the irrigation savings associated to wheat cropping instead of maize may not be to the benefit of summer flow levels.

According to our analysis of the simulations’ outputs, those mainstreams proposals should not to be seen as generic solutions, but instead should be well evaluated at sub-basin level, taking specific situations into account (e.g. is the basin subject to upstream dam releases? Is it mostly agricultural land or also subject to urban or natural areas runoff?). This type of investigation is possible using the MAELIA modelling and simulation platform.

Finally, we note that neither the mainstream proposals nor the co-designed alternatives for the Aveyron River basin suggest changes for crops other than grain maize. In the case of the downstream Aveyron agricultural

landscape, according to our model, seeds and fruit production are responsible for an average of 13% and 27% of annual withdrawal volumes. They are the most intensively irrigated crops, with respectively 249 and 259 mm simulated average whereas regular grain maize production is irrigated with 203 mm in average. One could think they should be taken into account for change proposals. However in the Adour-Garonne area, and in the downstream Aveyron River, those two productions generate a large part of farms economic performances, the agricultural profession has a historical and cultural attachment, and they employ a lot of people seasonally.

3.2 How else can the Alternative be used?

We point out that they can be useful for future discussions on how to solve the quantitative water management crisis issue. First of all, they have the potential to facilitate interactions between participants for multi-stakeholders discursive arenas tackling quantitative water management issues in the area. Indeed they bring quantified data available at many organizational level and aggregate types. The quantification should not be considered right but can be considered accurate and acceptable as the model was positively evaluated by local experts. Even if some experts would have the capacity to anticipate part of the models' outputs and the resulting analyses, we advance that such integrated model allow to objectify the whole SAH system functioning. In other words, the models' outputs provide stakeholders with elements of objectivity. For this reason we consider that the alternatives and their analysis are good boundary objects, they provide common ground, the first step towards the construction of shared knowledge in a multiparty group (Beers, Boshuizen, Kirschner, & Gijsselaers, 2006).

These initial alternatives can also be used as "intermediate objects" in future D&A cycles to design new alternatives with potentially greater degrees of change and complexity. Iteration of design cycles should allow the group to progressively address the complexity of the entire SAH system in which the agricultural landscape is embedded, manipulating not only agricultural domain elements but also those from hydrological, biophysical, and even water-resource management domains to describe and refine new options for change.

3.3 The importance of modelling choices

Hereafter, we wish to highlight the sensitivity of the simulations outputs to key modeling choices made during both the instantiation of the MAELIA platform and the formalization of alternatives. First, the parameterization of "thresholds" can have a strong influence on outputs, mainly those required in (1) the modelling of crop management and water managers' decision rules, and (2) for the selection of areas concerned by the alternatives (acceptability thresholds).

Parameterization of thresholds in CMS are in fact a matter of representing farmer's decision thresholds. When analysing the temporal distribution of simulated withdrawals, we noted that technical operations are often implemented on the same date for all identical CMS in the different concerned farms. This is of particular importance concerning the withdrawal dynamics, because such uniform simulated behaviour results in regular withdrawals peaks. This issue is common for numerical models where agents with identical decision rules behave strictly identically. To unravel this problem, we introduced specific formalisms that represent the variability thresholds between farmers. For example, we modulate irrigation decision rule's thresholds by drawing a value in a range of $\pm 20\%$ of the original cumulated rainfall threshold. This helps reproducing the heterogeneity of farmer' behaviour.

Finally, the formalization of options is also very sensitive to thresholds. As pointed out in section 1.3.2 for AltPrec1.3, the 20% acceptability threshold was manipulated taking the current situation's spatial delineation of fields, i.e. excluding the possibility to split fields in two as to implement the alternative. We allocated the change in maize cultivar and sowing practices farm by farm, starting from the smallest candidate fields in the farm territory until we reached 20% of the farm's annual maize area. In many candidate farms, this resulted in adapting

the threshold to a lower value because just a few large fields represent more than half of the annual area dedicated to maize production. Eventually, the impacted area reaches only 15% of the candidate area. One could consider that when changing maize cultivars, large fields could be delineated to host two type of cultivars.

Another level of choice which influences the simulation outputs resides in the choices made to interpret the expression of participants of the design exercises. For example to formalize AltPrec, we considered that the sowing density for maize early cultivars would be that which is current in the case study area i.e. early cultivars are sown with higher densities than late cultivars so as to compensate the loss of biomass production. Hence, considering that, we did not change the parameterization crop coefficient dynamics for the early cultivars in the alternative. Figure 37 shows that as a result, all maize cultivars have about the same crop coefficient dynamic until flowering stage, and thus the same need for water. Considering that the participants did not explicitly state that the early cultivars should be sown in high densities, we could have formalized the alternative by reducing the crop coefficients. This would have reduced the early demand for irrigation in those fields and thus could avoid the unexpected effect it has on early dam releases, which was discussed above.

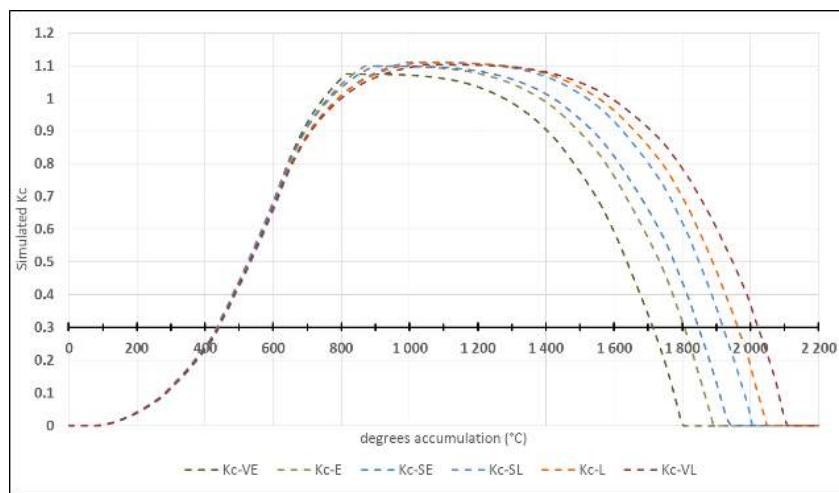


Figure 37: Simulated Kc for all cultivars in the model, with satisfactory irrigation level. The figure shows that our parameterization figures the compensation of lower biomass production in early cultivars by higher sowing densities.

Another example of interpretive choices is to have allowed for the irrigation of wheat in the fields impacted by AltRot, i.e. irrigate wheat when introduced in a maize monocropping field. This participates in higher withdrawal level than in the current situation at the beginning of summer (Figure 35).

This experience leads us to say that even in participatory approaches that stress the importance of eliciting stakeholder’s knowledge and that put efforts in iterative modelling methods, modelers should remain conscious of their choices and the impact that they may have. We stress that there is still a need to further describe the implementation of those alternatives with higher degrees of technical specificities. We believe that this first formalization and simulation of alternatives lay the foundation for further collaboration between scientists and stakeholders to design efficient alternatives as they allowed to identify the “ties” of the SAH system.

Conclusion

In this paper, we show the interest of using a multi-agent simulation platform with fine spatial and temporal resolutions to assess the impact of changes in the agricultural landscape on the social-agro-hydrological system functioning. Whereas in agronomy, designed changes or innovations are often assessed at field or farm level, the modelling platform we used allow to design and assess changes at the many levels of the SAH system. Notably,

we developed a farmer agent model that allows to simulate finely farmer practices on all fields of the agricultural landscape taking farm (workflow) and landscape (soil-climate) specificities into account. The model was validated through expert consultation at various organization levels and for various output variables.

We simulated effect of two alternative cropping system spatial distributions on the whole socio-agro-hydrological system functioning using observed climate data from 2000-2011. Even if the co-designed alternatives resulted in lower withdrawal levels in the impacted fields, simulations show that they may have unexpected effects, for example higher water releases volumes or delayed return to normal of river flows. More generally our study shows that to deal with resources management issues, it is necessary to develop decision support systems that represent interactions between the key components of the concerned social-ecological system at the adapted spatial and temporal resolutions. The MAELIA platform allows to do so.

The main limitation of our assessment approach is the lack of socio-economic indicators. This should be the main concern for further design and assessment cycles. The MAELIA platform already provides the necessary modelling framework to do so since it allows to calculate e.g. labor time, yields and gross margins at different organization levels. Here the challenge relies on collecting the necessary inputs and in the development of an adapted scale change procedure which allows to display simulation outputs at the different levels of interest for stakeholders (e.g. field, group of fields, farm, cooperative production basin).

Acknowledgments

This research was developed in the frame of both the MAELIA Project (Multi-Agents for Environmental norm Impact Assessment) funded by the Thematic Network for Advanced Research “Sciences & Technologies for Aeronautics and Space” (RTRA STAE Foundation <http://www.fondationstae.net/>) in Toulouse, France and the TATABOX project (Territorial Agroecological Transition in Action: a tool-BOX for designing and implementing a territorial agroecological system transition in agriculture; ANR-13-AGRO-0006) funded by the French National Agency for Research.

Partie III

Discussion

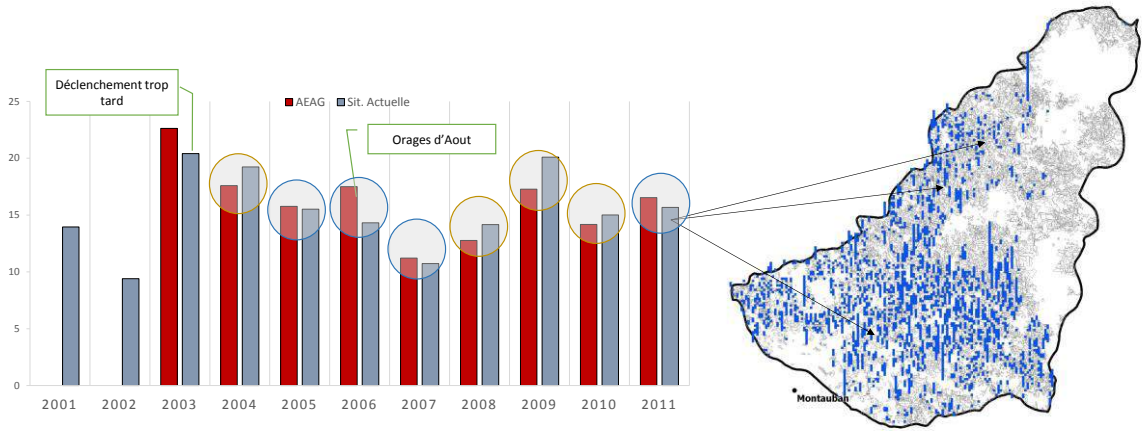


Figure 38 : Volumes estimés par l'agence de l'eau et volumes simulés dans la situation actuelle ; répartition des volumes simulés dans les parcelles du territoire

Quelle connaissance scientifique?

Nous discutons ici des questions de recherche posées en partie I de manière globale. Les choix spécifiques aux sous-questions qui les déclinent sont présentés et discutés dans la partie II (les 3 articles). Le résultat principal de mon travail de doctorat s'incarne dans la méthodologie de conception-évaluation développée et son test en situation réelle. Le fait d'avoir mis en œuvre les 3 étapes (modélisation, conception, et simulation-évaluation) de cette démarche me permet de discuter ci-après des atouts et des limites qu'elle présente.

1 L'importance de l'étape de représentation de la situation actuelle

Un élément majeur qui ressort de cette expérience est l'utilité de construire une représentation suffisamment stable et partagée entre les scientifiques et les acteurs, et entre les acteurs eux-mêmes. L'étape 1, qui avait pour but de définir et représenter le système Socio-Agro-Hydrologique (SAH), a posé les bases du succès des étapes qui ont suivi. Elle a en effet fourni des outils de modélisation nécessaires aux travaux de conception et à l'évaluation des systèmes conçus par les acteurs impliqués dans mon dispositif. Je note cependant l'importance d'envisager la représentation du système dans son état initial comme un processus continu, à enrichir au fur et à mesure du déroulement des autres étapes de la démarche et des nouveaux besoins de représentation qu'elles font émerger.

Le travail de construction du modèle n'a été possible que par l'articulation de plusieurs sources de données, de méthodes et d'outils « *soft* », relevant des sciences sociales comme l'ingénierie des connaissances (« *soft system approaches* ») et « *hard* », relevant des sciences de l'environnement, de l'agriculture et de la modélisation (« *hard system approaches* ») (Gleick, 2003; Pahl-Wostl & Hare, 2004). Les méthodes qualifiées de « *soft* » font généralement référence à des modes de production de connaissances à partir de savoirs locaux, le plus souvent qualitatives mais pas uniquement (ex. élicitation de seuils). Les méthodes qualifiées de « *hard* » font références à des modes de production de connaissances quantitatives telles que le calcul. Ces dernières incluent le plus souvent des connaissances génériques comme les savoirs scientifiques.

Comme nous l'avons présenté dans l'article 1 avec l'exemple de la modélisation du paysage agricole, j'ai mis en œuvre une diversité de méthodes *hard* et *soft* pour collecter, structurer et intégrer des sources d'information variées. Cette approche est d'ailleurs récurrente dans les publications récentes sur la gestion des ressources naturelles. Dans mon travail j'ai qualifié ma démarche d'hybridation de méthodes et de l'information. Elle m'a permis de répondre à deux enjeux majeurs pour la représentation du système SAH : le manque d'information et donc le besoin de la compléter, mais aussi la volonté de regarder un même objet par différents points de vue afin d'objectiver les visions et de proposer une représentation partagée et robuste.

Durant cette étape de représentation de la situation actuelle, j'ai identifié des décalages importants entre les informations génériques disponibles et les besoins pour modéliser le système étudié, tout autant en termes de domaines et niveaux d'organisation traités que dans les résolutions spatiales et temporelles. Par exemple, dans le domaine de la gestion quantitative de l'eau, les échelles de gestion sur lesquelles j'ai porté mon intérêt ne correspondent pas aux échelles auxquelles les données sur les prélèvements ou sur les sols sont disponibles. J'ai également identifié un besoin de mise en cohérence des connaissances locales (*soft*) avec les informations génériques disponibles (*hard*) à l'échelle nationale, besoin pour lequel les méthodes participatives sont particulièrement adaptées. Dans le domaine agricole par exemple, nous aurions pu utiliser des méthodes de fouille de données pour identifier des pratiques de rotation récurrentes dans les séquences reconstituées du RPG, typiquement une méthode *hard*. Afin d'assurer la crédibilité des résultats, j'ai plutôt choisi de mobiliser la connaissance experte (*soft*) des acteurs sur ce sujet pour guider la réalisation d'un algorithme (*hard*) permettant

d'associer une pratique de rotation à chaque parcelle du territoire. Ainsi, je produis une connaissance hybride, basée sur l'information générique (issue du RPG) et enrichie par des connaissances d'acteurs.

J'ai aussi identifié des décalages importants entre les points de vue des diverses parties prenantes sur les variables clés des systèmes. Par exemple alors que certains se satisfont des mesures de débit aux points DOE contrôlés et mis à disposition par les DREAL²⁴, d'autres remettent en question leur objectivité. D'autres encore considèrent que l'enjeu est plutôt sur des petits cours d'eau pour lesquels aucun point de suivi n'est disponible. J'ai aussi identifié des variables clés qui ne sont pas mesurables avec les moyens actuels et qui pourtant sont nécessaires pour réfléchir à la planification des étiages – par exemple le débit instantané de prélèvement pour l'agriculture sur un tronçon de cours d'eau ou un groupe de ressources. Dans ce type de situations, où les faits sont incertains, croiser diverses sources d'information permet non pas de produire une variable objective mais de proposer une valeur acceptée comme le meilleur proxy de celle-ci et pouvant donc servir de référence à la réflexion. Comme expliqué dans la partie résultat de l'article 1, j'ai d'ailleurs expérimenté que les acteurs qui ont collaboré à la production de ce type de connaissances hybrides sont par la suite prêts à remettre en question leur point de vue initial.

2 Le besoin de progressivité et de répétitivité

De manière générale, un élément important pour l'aboutissement de ma démarche de conception-évaluation est d'assurer la progressivité des processus cognitifs et collectifs en œuvre, qui s'articulent toujours autour d'un ou plusieurs modèles. D'un point de vue cognitif, du fait de la complexité des éléments étudiés, que ce soit pour représenter le système SAH ou pour concevoir les alternatives, j'ai mobilisé et articulé une diversité de méthodes qui se basent toujours sur des aller-retour entre terrain et laboratoire, entre collecte d'information et formalisation de celle-ci dans des modèles. Dans ce type de processus itératif les modèles sont à la fois produit et support de production.

Les modèles comme supports de production sont utilisés comme objets intermédiaires. Ils permettent (i) aux acteurs d'exprimer leur connaissance en relatif du modèle (de l'information formalisée dans le modèle), (ii) aux chercheurs de formaliser leur compréhension des discours des acteurs et en retour (iii) aux acteurs de réagir sur ces formalisations et si besoin favoriser leur adaptation pour aboutir à une formalisation acceptée. L'article 2 notamment montre les aller retour nécessaires pour obtenir une formalisation stabilisée des alternatives de distributions spatiales des systèmes de culture qui correspondent aux visions des participants.

Du point de vue de la dynamique de collaboration, la construction progressive du modèle de système SAH (étape 1) a permis de créer avec les acteurs agricoles une relation de confiance qui a abouti à leur implication dans la démarche alors qu'au départ du processus l'idée même de penser aux changements de pratiques n'était pas envisageable (Cf. partie I). Par ailleurs, le fait que chacun des deux groupes ait demandé à connaître le résultat de l'autre groupe et le fait que soit finalement organisée une réunion commune afin d'échanger sur les solutions possibles démontrent qu'une dynamique collective positive a été initiée par l'application de la méthodologie. Ce phénomène, comparable à ce que Jakku & Thorburn (2010) appellent *interpretative flexibility*, n'était pas un objectif de ma démarche mais constitue un résultat non négligeable compte tenu du climat de négociation qui existe autour du sujet de la gestion quantitative de l'eau.

J'ai organisé cet échange comme une restitution des travaux de recherche menés dans le cadre de ma thèse. Je l'ai construit autour des alternatives proposées par chaque groupe et des résultats d'évaluation obtenus pour chacune d'elle. Je considère cette restitution comme la fin d'un cycle de conception-évaluation, qui propose aux acteurs des résultats de recherche suffisamment riches pour permettre la formulation d'une nouvelle question,

²⁴ Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement

point de départ d'un nouveau cycle de conception-évaluation. Cette notion de cycle répété pour la recherche participative est présente dans de nombreux écrits scientifiques (ex. Barreteau, Bots, & Daniell, 2010; Fischer, Giaccardi, Eden, Sugimoto, & Ye, 2005; Golspinck, 2002; Lewin, 1946; List, 2006). Lorsque les résultats sont suffisamment aboutis, ils permettent non plus seulement aux chercheurs, mais aussi aux « décideurs », de formuler une nouvelle question d'intérêt. On peut imaginer que sur la base des alternatives conçues, le collectif mobilisé s'oriente vers de nouvelles questions plus spécifiques. Par exemple, à la vue des effets non anticipés des alternatives simulées (augmentation des besoins en début d'étiage et mobilisation précoce des stocks d'eau), je proposerais d'aborder une nouvelle boucle de conception avec la question appliquée suivante :

Quels systèmes de cultures et stratégies de lâchers d'eau pour anticiper la mise en place de l'étiage ?

Cette question amènerait le collectif non plus à se limiter dans la conception d'alternatives de distribution spatiales des systèmes de culture mais aussi à exprimer leurs visions sur d'autres éléments du système SAH, tels que les modalités de lâchers d'eau.

3 L'utilité de modèles fins

Pour répondre aux questions de recherche de ma thèse, j'ai fait le choix de déployer une plateforme de modélisation qui propose des résolutions spatiales, temporelles et fonctionnelles fines (sous-systèmes) pour les trois sous domaines du système socio-écologique traité, et qui simule les interactions clefs entre les différents sous-systèmes de ces domaines. Il est nécessaire d'évaluer la pertinence du déploiement de tels moyens informatiques (au sens de traitement de l'information) pour représenter un territoire irrigué alors qu'une logique de simplification serait plus intuitive. Deux objectifs m'ont orienté vers le choix de la finesse et du détail pour représenter le système SAH : (1) la possibilité de conduire un processus de conception participative qui fasse sens pour les acteurs d'une part et (2) la volonté de représenter la nature distribuée et spécifique des situations de pénurie d'eau au sein des bassins versant à déficit (Cf. introduction) et des phénomènes d'émergence induits.

3.1 Proposer un espace de réflexion réaliste et suffisant

Dès le début de mes travaux, j'ai imaginé le modèle à construire comme un support efficace et stimulant pour la conception du changement avant d'être un outil pour simuler ce changement. Il devait présenter la gamme d'éléments du système susceptibles d'être manipulés par des acteurs pour concevoir et évaluer des changements dans les situations de prélèvement sans savoir a priori quels niveaux d'organisation ou échelles spatiales et temporelles seraient manipulées. Pour constituer ce support, j'ai fait le choix de représenter les éléments et niveaux d'organisation manipulés par les acteurs du système SAH dans l'exercice de leur activité professionnelle, à leurs échelles de décision et d'action, considérant qu'ils pourraient les mobiliser pour concevoir ou évaluer une alternative. J'avais bien sûr anticipé que les travaux de conception m'amèneraient ensuite à intégrer de nouveaux éléments qui ne me seraient pas apparus nécessaires initialement (ex. certaines pratiques ou certaines ressources), mais il fallait proposer une base de travail suffisante. Modéliser le système de manière fine m'a donc permis de faciliter l'exercice de conception. Un modèle aussi diversifié permet aux acteurs d'exprimer une grande gamme de scénarios et ne limite pas trop l'espace des solutions testables.

La réaction des participants aux ateliers de conception face à la présentation du modèle co-construit a été très positive. Ils ont exprimé leur surprise face à la diversité des éléments et des processus représentés en comparaison avec d'autres approches qu'ils avaient déjà expérimentées et qui se basaient généralement sur une modélisation plus grossière et simpliste (ex. sur des typologies d'exploitations). Ce choix de modélisation a notamment fortement participé à crédibiliser notre démarche vis-à-vis du monde agricole qui revendique justement la nécessité de bien représenter la spécificité des situations de production et de prélèvement et rejette l'idée de solutions génériques, uniformes et trop simplistes.

3.3 Représenter des phénomènes émergents et pouvoir les analyser

Comme je l'ai déjà expliqué dans la première partie de ce mémoire et repris dans les introductions des articles, le dépassement des DOE est un problème qui s'exprime et est géré à une échelle temporelle journalière, et qui émerge de situations de prélèvements localisées et spécifiques. En recherchant la finesse spatiale et temporelle et en mobilisant une approche multi-agent de la modélisation, j'ai souhaité représenter ces spécificités pour permettre une analyse fine du problème et en capturer les tenants et aboutissants.

Cette approche de modélisation permet alors de spécifier les situations de production ou les pratiques de gestion qu'il faudrait faire évoluer et de représenter leurs interactions avec les composantes du système SAH. J'ai ainsi montré qu'une telle finesse permet de représenter les interactions entre systèmes de culture, situations pédoclimatiques, hydrologie des ressources en eau et gestion des barrages. Dans l'article 3 par exemple, nous montrons que l'insertion de céréales d'hiver dans les monocultures de maïs a des effets inattendus sur le débit des affluents non réalimentés. Nos simulations montrent que les débits des alternatives sont parfois plus bas que dans la situation actuelle (simulée). Pour aller plus loin dans la compréhension des interactions en jeu, il serait nécessaire d'analyser les processus biophysiques et le comportement des agriculteurs qui sous-tendent ces phénomènes. Par exemple, nous avons identifié un effet des stratégies de changement de ressource pour l'irrigation en cours de campagne, depuis le cours d'eau vers d'autres ressources (ex. lacs ou ASA) en fonction de la disponibilité en eau dans les cours d'eau. Cette stratégie semble limiter l'impact positif de l'alternative sur le débit en cours d'étiage puisque les prélèvements ne se font plus directement dans le cours d'eau. Nous avons également constaté un assèchement du sol par les céréales d'hiver avant l'installation de l'étiage qui limite le drainage des parcelles agricoles avant, pendant et à la fin de l'été. Pour analyser les effets de ces multiples interactions il sera nécessaire de développer des méthodes statistiques qui permettent d'analyser la significativité des phénomènes au sein et entre les périodes d'étiage, c'est-à-dire en considérant la variabilité climatique intra et interannuelle pour les différents sous-bassins du terrain d'étude.

3.4 Limiter les biais d'agrégation

Une approche de modélisation certainement plus simple à mettre en œuvre consistait à agréger des éléments constitutifs du système SAH, comme par exemple via une typologie des exploitations agricoles. J'avance qu'elle n'aurait probablement ni permis de concevoir des alternatives qui précisent aussi finement la répartition fonctionnelle des changements, ni d'en évaluer les impacts à une résolution spatiale et temporelle aussi précise.

Jansen & Stoorvogel (1998) discutent de l'importance du biais d'agrégation dans les modèles agronomiques aux échelles territoriales. A cette époque, comme encore souvent aujourd'hui, les modèles se basaient sur des typologies d'exploitations. Ces typologies cherchent à simplifier la complexité observée en définissant des groupes représentatifs, dont la variabilité interne des caractéristiques clés pour l'étude est inférieure à la variabilité inter groupes. Elles sont un moyen efficace pour décrire une situation mais aussi, comme le remarquent ces auteurs dans le cas des modèles de programmation linéaires, pour contourner les manques de données, de moyens humains et financiers, et des faibles puissances de calcul :

"[...] Modelling each individual farm is usually impossible due to data, manpower, financial and computer software limitations."

Ces auteurs remarquent aussi que les résultats de calculs ou de simulations qui se basent sur des typologies présentent des biais d'agrégation²⁵ liés au regroupement des individus dans des classes typologiques qui sont

²⁵ Différence entre les résultats obtenus par extrapolation du comportement d'un individu représentatif d'une classe typologique, et ceux obtenus par représentation de tous les comportements individuels de celle-ci. Le biais d'agrégation représente donc la perte d'information sur l'hétérogénéité de comportement des individus d'une classe typologique. Ex. lorsqu'un préjudice est multiplié par un nombre d'utilisateurs alors que le préjudice n'est pas le même pour tous les utilisateurs.

difficiles voire impossibles à anticiper. Considérant que les bases théoriques statistiques pour développer des typologies « parfaites » sont peu opérationnelles, ils expliquent que les modélisateurs doivent adopter des méthodes qui permettent de réduire ces biais :

Since theoretical criteria to achieve zero aggregation bias are not very useful in practice, modellers usually try to reduce aggregation errors (rather than to seek exact aggregation)

Le choix de finesse de représentation de la structure et des processus du système SAH, et la technologie mobilisée pour y répondre, a été pour moi le principal moyen de réduire le risque de biais d'agrégation. Je pouvais ainsi préciser le plus finement possible la diversité des situations de prélèvement représentée dans le modèle de système SAH. Il est important de noter que l'accès à l'information géographique est de plus en plus facile, qu'elle est de plus en plus utilisée par les scientifiques mais aussi par les acteurs et que les temps de calcul ne sont plus réellement un facteur limitant au regard de la complexité que j'envisageais de modéliser et simuler.

Le modèle du paysage agricole que je propose comprend une typologie de parcelles basée sur les déterminants des systèmes de culture identifiés par les acteurs (5 équipements d'irrigation, 9 sols, 2 exploitations, 18 rotations, 21 cultures). Pour chaque type de parcelle défini par une combinaison donnée de déterminants, le système de culture est défini par un jeu de règles de décisions. Si 34 020 combinaisons différentes sont possibles, toutes ne sont pas observées dans le modèle construit (par exemple on ne trouve pas de vergers cultivés dans les sols de causses). J'ai abouti en fait à 280 types de parcelles qui correspondent chacune à une situation culturale (une culture dans un système de culture). Lorsqu'on couple le modèle du paysage agricole aux autres modules du modèle du système SAH, les parcelles d'un même type se différencient en fonction des ressources en eau auxquelles elles sont liées, mais encore au travers du climat, des caractéristiques et de la disponibilité de la main d'œuvre sur l'exploitation. Chaque parcelle devient alors une situation de prélèvement unique !

Le principal risque pour les développeurs de ce type de modèle très fin est d'obtenir un modèle d'une grande complexité, une « usine à gaz », difficile, voire impossible, à calibrer (*constructs that are perfectly valid as software products but ugly and useless as models* dans Voinov, 2010). Je n'ai pas rencontré ce problème. Les phases de calibration puis de validation ont été relativement aisées et rapides, et les acteurs ont validé la qualité des résultats. Ceci est dû, je pense, au fait d'avoir construit les formalismes et paramétré les différents modules en interaction répété avec les acteurs. Par exemple, avant de coder les formalismes représentant la décision des agriculteurs, j'ai validé les algorithmes et leur paramétrage avec un groupe d'experts agricoles (voir article 1 de la thèse).

4 Apports à MAELIA, apports de MAELIA

Je fais ici le constat que cette approche de la modélisation, qui cherche à simuler finement un ensemble de processus spatio-temporels en interaction, n'est possible que grâce à l'avancée technologique des outils de mesure, de stockage de l'information, des méthodes de programmation²⁶ et des puissances de calcul. Non seulement les moyens techniques sont aujourd'hui réunis, mais en plus leur disponibilité est croissante dans le monde scientifique et socio-économique. La plateforme de simulation MAELIA²⁷ en est un très bon exemple pour ce qui concerne le domaine de la gestion quantitative des ressources en eau. Mes travaux de thèse ont été la première occasion d'appliquer la plateforme MAELIA dans le cadre d'un projet de recherche-intervention. Ils ont mis en lumière les atouts de la plateforme, mais aussi des contraintes, des limites et des perspectives pour son utilisation par les scientifiques et par les acteurs. En me basant sur mon expérience d'utilisation dans un processus participatif pour la conception et évaluation, je discute ci-dessous des forces et des faiblesses de cet outil d'aide à la décision.

L'expérience MAELIA sur l'Aveyron aval a permis de valider/redéfinir une hypothèse qui avait été faite par le collectif à l'origine de la plateforme : il faut proposer une architecture de modélisation souple, adaptable au sujet traité, à l'approche choisie et aux données disponibles pour le terrain. En effet, j'ai pu démontrer que certains modules doivent pouvoir être désactivés afin de laisser la possibilité de greffer des modules qui répondent au besoin d'utilisation de la plateforme tout en considérant la disponibilité des données, les objectifs des simulations et les contraintes des phases de calibration et de validation. Par exemple, j'ai eu besoin de désactiver un module qui simule la décision d'assolement des agriculteurs d'année en année afin de tester des distributions spatiales de systèmes de culture spécifiées par les acteurs du dispositif de conception. J'ai également contribué à améliorer la représentation des systèmes agricoles dans la plateforme pour les besoins de la démarche de conception-évaluation menée. J'ai, en effet, participé à la spécification de l'interface de la plateforme et des algorithmes qui permettent respectivement de décrire finement les systèmes de cultures dans le paysage agricole (cf. figure 7 de l'article 1) et de représenter les stratégies de conduite des cultures en fonction de l'état du système sol-plante-ressources en eau, ainsi que les stratégies de changement de ressources en cours de campagne en fonction des restrictions de prélèvements et de leur état de remplissage.

L'instanciation de la plateforme a été un réel défi méthodologique, que je n'ai pu dépasser que grâce à ma posture de recherche participative. En effet, instancier ce type de modèle nécessite d'intégrer un nombre important de données de nature très variable et de paramétrer une large gamme de processus (notamment l'hydrologie des différentes ressources en eau, le comportement des agents agriculteurs et des gestionnaires de barrage, et la gestion des restrictions de prélèvements). La disponibilité des données d'un territoire à un autre peut fortement varier (ex. existence et précision d'une carte des sols, géo-référencement des réseaux d'irrigation, information sur les systèmes de culture). Pour utiliser MAELIA dans un projet de recherche action, l'utilisateur de la plateforme devra mettre en place des méthodes similaires à celles développées dans ma thèse basées sur l'hybridation de l'information (cf. article 1). Cependant, l'instanciation de MAELIA réalisée dans le cadre de mes travaux a permis de développer des jeux de paramètres qui pourront être repris mais devront être adaptés dans le cadre d'utilisations futures. C'est tout particulièrement le cas si elles sont réalisées dans des zones présentant des systèmes de culture et des situations pédoclimatiques similaires.

L'architecture de MAELIA, pensée pour représenter les systèmes socio-écologiques, permet de structurer l'intégration des données. En effet, l'instanciation de la plateforme présente l'avantage de mettre en lumière les données nécessaires et les processus à calibrer pour simuler le système socio-écologique dans son ensemble. La plateforme a, par ailleurs, démontré sa capacité à générer de l'information utile pour instruire la question

²⁶ Notamment la simulation multi-agent

²⁷ <http://maelia1a.wordpress.com/>

appliquée posée (Cf. exemple en section 2.3 de cette partie). Cela constitue un autre apport de mes travaux pour le projet MAELIA : prouver qu'une telle plateforme a la capacité de produire une information utile, c'est-à-dire qui renseigne sur les processus intéressants les acteurs de la gestion de l'eau à un niveau de détail qui fait sens du point de vue de leur échelle de décision et d'action et ainsi nourrir la réflexion autour de la gestion des étiages pour le respect des DOE.

Cependant, je souhaite ici souligner que la plateforme MAELIA ne peut pas être considérée comme un objet intermédiaire mobilisable dans un atelier participatif. En effet, le temps nécessaire pour implémenter une alternative (de 30 min à une demi-journée suivant le degré de changement par rapport à la situation actuelle²⁸) et simuler ses effets sur une dizaine d'années (de 2 à 6 heures suivant les sorties demandées et leur niveau d'agrégation) ainsi que le manque de fonctionnalité automatisée de traitement et d'affichage des sorties rendent impossible son utilisation en direct avec les acteurs. Il est donc nécessaire d'organiser des aller-retour entre ateliers de conception et analyse des résultats en laboratoire où sont conduites les simulations. En revanche, les éléments qui constituent les simulateurs (entrées, formalismes et sorties) peuvent être mobilisés pour réfléchir avec les acteurs comme objets intermédiaires. Par exemple, le module agricole peut être appliqué sur un petit nombre de situations dans des ateliers de conception pour explorer les effets potentiels de systèmes de culture à l'échelle de la parcelle ou d'un agrégat d'exploitations. Les sorties de simulation, une fois traitées, peuvent être formatées pour être utilisées comme objet intermédiaire avec les acteurs. Ainsi par exemple, pour discuter des sorties sur l'hydrologie simulée, j'ai testé l'utilisation du logiciel R. Grâce à ce dernier et à des scripts préexistants, nous générons rapidement des jeux de données analysés et leurs affichage sous forme de graphiques, en fonction de critères et de niveaux d'agrégations spatiaux, organisationnels ou temporels demandés par un groupe d'experts. Ceci pose les bases d'une méthode participative interactive pour l'évaluation multicritère des sorties de MAELIA.

²⁸ La formalisation (et l'intégration) d'une nouvelle distribution de systèmes de culture dans MAELIA est gérée en deux temps : (1) mise à jour ou création d'un ou plusieurs itinéraires techniques (« *Crop Management Strategy* - CMS » dans la nomenclature de MAELIA, voir article 1 et 3) c'est-à-dire adaptation ou création d'un jeu de paramètres de règles de déclenchement des pratiques culturales et (2) développement d'une requête SQL pour affecter un système de culture (séquence et CMS) à chacune des parcelles du territoire. Ces requêtes peuvent intégrer des critères relatifs au niveau exploitation pour respecter des critères de changement (ex. la part maximum de la SAU concernée par les changements).

Quelle applicabilité des connaissances?

1 Questionner des idées reçues

Mes travaux ont abouti à des résultats thématiques qui sont, dans une certaine mesure, contre-intuitifs. A la question posée - Quelles distributions spatiales des systèmes de culture dans les territoires irrigués pour limiter l'occurrence des crises de gestion quantitative de l'eau ?- je réponds : aucune de celles que j'ai co-conçues et évaluées dans le cadre de la thèse. L'article 3 montre en effet que les alternatives ont un impact limité, voire nul ou même inverse si elles sont mises en œuvre dans les proportions exprimées comme étant acceptables par les participants de la profession agricole.

En revanche, la simulation des alternatives a permis de quantifier l'effet de propositions classiquement avancées comme des solutions aux difficultés à respecter les DOE dans les bassins versants du BAG. Ces simulations mettent en lumière que :

Remplacer les monocultures de maïs par des cultures de céréales d'hiver pourrait avoir comme effet de rallonger l'étiage dans certains sous-bassins. Ce phénomène est favorisé lorsque le débit des cours d'eau du sous-bassin est lié au drainage des parcelles agricoles irriguées donc aux stratégies d'irrigation (par ex. en tête de bassin où la majorité de la SAU est en maïsiculture) ;

Remplacer les monocultures de maïs par des cultures de céréales d'hiver ne permet pas d'augmenter les débits d'étiage dans les situations où les irrigants ont accès à une ressource « déconnectée » des cours d'eau ;

Semer des variétés de maïs précoce permet effectivement de réduire la demande en eau agricole mais augmente le besoin en début de saison et donc peut conduire à des lâchers de barrages précoces.

2 Des résultats méthodologiques et thématiques transposables?

Une question importante concernant le caractère transposable des résultats est de savoir si l'outil de simulation et les alternatives produites sont utilisables pour traiter de questions de gestion quantitative de l'eau dans d'autres bassins versants du BAG ou même d'autres régions du monde.

La plateforme de modélisation et de simulation MAELIA est par nature transposable à d'autres situations. Elle a justement été développée pour permettre de représenter les situations de gestion de l'eau dans le BAG voire plus généralement en France. Son instanciation sur le bassin de l'Aveyron aval est, en soi, une démonstration de son caractère transposable.

La question réside plutôt dans la disponibilité des informations nécessaires en entrée. Mon travail de thèse rend disponible des paramétrages de sols et de cultures²⁹, mais aussi des paramétrages de stratégies de conduite des cultures en fonction de rotations, de sols et de systèmes de production. Un utilisateur de MAELIA pourrait choisir de les utiliser comme base de départ pour développer de nouveaux jeux de paramètres adaptés à des terrains (bassins versants) considérés comme similaires. Pour cela, il pourrait présenter la représentation des systèmes de culture que j'ai développée à des experts de son terrain d'étude et les amener à exprimer en relatif les changements à réaliser pour adapter ce jeu de données aux spécificités de ce terrain.

²⁹ pour le modèle *AqYield*. Cf. Annexes 4 et 5 de la thèse

Je considère que la méthodologie de conception et d'évaluation en trois étapes est théoriquement transposable « telle quelle », ou avec de faibles adaptations, à tous les bassins versants d'Europe car le RPG (*Land Parcel Identification System*) et toutes les autres informations génériques nécessaires (climat, modèle numérique de terrain) y sont disponibles. Concernant les sols, je souhaite souligner qu'une certaine finesse d'information sur les sols est cruciale pour garantir la finesse de représentation des dynamiques agricoles et hydrologiques, puisque les deux modules mobilisent cette information à plusieurs niveaux de calcul. Là où l'information générique n'existerait pas, il est envisageable de ne se baser que sur la connaissance locale pour cartographier les sols, mais il faut considérer que cela demanderait un lourd travail d'ingénierie des connaissances. Concernant l'hydrologie, nous avons choisi de forcer certaines valeurs de débit en entrée du modèle SWAT car l'information observée était disponible, mais nous aurions également pu utiliser les formalismes de SWAT pour simuler l'hydrologie de tout le bassin versant.

Quoiqu'il en soit, je souligne ici que le travail de représentation du territoire nécessite d'adopter une posture de recherche intervention et des moyens importants pour affiner, adapter, mettre en cohérence l'information générique et les connaissances en entrée de MAELIA. Cette phase est indispensable pour permettre des résultats de simulation satisfaisants et acceptables pour le collectif acteurs-chercheurs.

Concernant les alternatives produites, je pense qu'il serait intéressant, dans le cadre d'une démarche de recherche en agronomie du territoire, de les tester sur d'autres territoires irrigués. Il serait possible d'évaluer leurs effets sur d'autres systèmes SAH, soit dans leur forme actuelle, soit dans des formes retravaillées (ex. changement des seuils d'acceptation). On pourrait en effet tester leurs effets sur des territoires irrigués qui présentent d'autres caractéristiques biophysiques ou hydrologiques, des normes ou une infrastructure hydraulique différentes. Cependant, je souligne que dans le cadre d'une démarche de recherche intervention ou pour un projet de plan de gestion locale, il serait intéressant de proposer une démarche similaire à celle de ma thèse pour accompagner les acteurs du bassin versant concerné dans la conception des changements à tester. Comme il est souvent exprimé par les auteurs ou les praticiens de ce type de travaux, la participation des acteurs à l'élaboration des scénarios de gestion est cruciale pour favoriser leur pertinence, légitimité et donc acceptation d'une part, et pour la compréhension mutuelle des enjeux d'autre part.

3 Effet de la recherche sur le terrain

La mise en œuvre de mes travaux de doctorat a eu des effets anticipés et non anticipés sur le système étudié que je souhaite rappeler ici. La démarche de modélisation du système SAH a eu pour effet d'objectiver certaines pratiques et de donner des éléments de quantification de variables manipulées, mais non mesurées, par les acteurs. Les experts ont principalement remis en question leur point de vue sur la dynamique des débits prélevés aux niveaux des zones administratives de mise en œuvre des restrictions, information non disponible avant la conduite des simulations avec MAELIA.

La démarche de conception d'alternatives en groupe séparés a eu pour effet de suggérer la curiosité d'un groupe d'opinion envers l'autre. Cet effet n'avait pas été anticipé. Alors que des acteurs de la profession agricole ont pu faire part de leur refus de collaborer avec des acteurs responsables (ex. DDT) ou impliqués (ex. Fédération de Pêche) dans la protection des milieux aquatiques, les participants des deux groupes ont exprimé leur envie de travailler ensemble dans un prochain atelier de conception. Pour des raisons de délais à respecter, j'ai cependant dû me contenter d'une restitution en commun à la fin de l'été 2014. Elle a mobilisé des acteurs directement concernés par ce sujet, comme, par exemple, le président de la chambre d'agriculture et le directeur de la DDT du Tarn et Garonne, lesquels ont exprimé des points de vue contrastés sur les résultats de l'exercice conduit.

Le type de connaissances produites via la construction et l'utilisation du modèle, notamment l'estimation spatialisée et au jour le jour de la demande en eau pour l'irrigation, intéresse particulièrement les acteurs actuels et futurs de la gestion opérationnelle des étiages. Certains d'entre eux (ex. les agents des services de la DDT, du

SMEAG, du BRGM et des Chambres d'agriculture 81 et 65) sont actuellement convaincus que le simulateur peut produire une information utile à la prise de décision concertée pour le soutien d'étiage où la gestion des restrictions de prélèvements. Ils sont intéressés, d'une part, par le développement d'un système d'information sur les systèmes de culture comme base de données complémentaire à leur système d'information sur les autorisations de prélèvements. Ils sont intéressés, d'autre part, par le potentiel de simulation proposé par MAELIA, et plus particulièrement par les modules agricoles qui permettent d'estimer la demande en eau d'irrigation au jour le jour et de manière spatialement explicite. Ainsi plusieurs types de projets en partenariat ont émergé des travaux conduits dans le cadre de ma thèse. Le premier est appelé GEDEAU et financé par l'ONEMA. il a conduit l'UMR AGIR à développer, en partenariat avec la DDT du Tarn et Garonne, le cahier des charges d'outil d'aide à la décision pour la gestion de l'étiage basé sur l'instanciation de MAELIA sur le bassin de l'Aveyron (projet en cours de finalisation, notamment avec la parution d'un démonstrateur de l'outil). Dans la dynamique de MAELIA et de ma thèse, deux projets de transfert sont également prévus avec ARVALIS et la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne. Ces deux organismes financeront pendant trois ans, respectivement à partir de janvier 2015 et de novembre 2014, deux « ingénieurs transfert » qui auront pour objectif de transférer les méthodes et outils développés.

Conclusion générale

Ce travail de doctorat m'a permis de développer et d'appliquer, et donc tester, une méthodologie participative de conception et évaluation de système Socio-Agro-Hydrologique (SAH). Elle est composée de trois étapes : (1) modéliser le système SAH, (2) concevoir des alternatives de distribution spatiale des systèmes de culture acceptables, (3) conduire une évaluation intégrée des alternatives face à la variabilité climatique observée. Elle est basée sur un dispositif participatif qui propose des allers retours entre travaux consultatifs et collaboratifs et laboratoire, et sur l'intégration de méthodes et connaissances « hard et soft ». Nous avons focalisé le travail de co-conception sur la formalisation d'alternatives de distributions spatiales de systèmes de culture, puis conduit l'évaluation, par simulation, de leurs impacts sur le fonctionnement du système SAH. Ceci nous a permis de montrer que les alternatives proposées ne permettent pas vraiment d'atteindre les résultats attendus sur la gestion des étiages, et encore moins sur la résorption du déficit structurel du bassin versant de l'Aveyron.

Au-delà de ces résultats, mon travail de thèse m'a permis d'identifier une voie qui me semble porteuse pour la gestion quantitative de l'eau dans le contexte de la réforme des volumes prélevables instaurée par la nouvelle loi sur l'eau. Il s'agit de la mise en œuvre, par les Organismes Uniques de Gestion Collective, de démarches multi acteurs et pluridisciplinaires pour le développement collaboratif d'un système d'information et d'un simulateur partagés. Pour qu'ils soient opérationnels dans la gestion stratégique et opérationnelle des étiages, ces outils devront être capables de représenter la dynamique spatiotemporelle de la demande agricole. Il faudra que leurs sorties soient non pas exactes mais suffisamment partagées pour être utilisées par des acteurs à enjeux différents. La méthodologie de conception-évaluation que j'ai déployée dans le territoire irrigué de l'Aveyron aval devrait fournir les briques élémentaires voire la logique d'intervention à mettre en œuvre.

Mon expérience a montré que la plateforme multi-agent MAELIA et les formalismes que je propose pour affiner la représentation de la dynamique spatiotemporelles de prélèvements, fournissent une architecture de modélisation adaptée. Elle permet d'intégrer connaissances génériques et locales et de générer une information acceptée par la diversité des acteurs rencontrés. En cela, elle est utile aux débats sur la gestion des modes d'utilisation des sols dans un objectif de gestion des ressources en eau, relevant d'une « gestion spatiale de l'eau ». Une réflexion doit aujourd'hui être menée sur l'importance de la finesse et de la multiplicité des interactions simulées pour produire une information qui correspond aux besoins des acteurs. Une question clef se pose : quelles simplifications des approches de modélisation serait-il possible de mettre en œuvre dans le cadre d'un projet appliqué, pour réduire les coûts de collecte d'information, d'intégration des données et de simulations, tout en conservant des sorties adaptées aux besoins des acteurs ?

La plateforme développée permet d'envisager de traiter cette question en évaluant pas à pas les biais d'agrégation induits par des simplifications ciblées. Ainsi, il est possible de tester l'effet de simplifications de la représentation de la distribution spatiale de sols et des systèmes de culture sur la représentation de la dynamique spatiotemporelle des prélèvements et sur l'hydrologie. On peut alors envisager d'avancer progressivement vers un type de modélisation correspondant à un compromis entre coût de mise en œuvre et qualité des sorties. Restera alors à évaluer la généricité de ces choix de simplification relativement à la diversité des territoires irrigués.

L'expérience de cette thèse a aussi permis de valider notre hypothèse selon laquelle les acteurs d'un territoire sont porteurs de visions d'adaptations pour résoudre un problème relatif à une ressource commune. Cependant, selon notre analyse des sorties de simulation, l'application de notre démarche de conception-évaluation n'a pas permis d'identifier des propositions qui soient réellement efficaces pour résoudre les problèmes de déficit en eau du bassin étudié. Je fais l'hypothèse que d'autres cycles de conception-évaluation doivent être mis en œuvre pour qu'émergent des propositions plus efficaces. Ces cycles additionnels pourraient remettre en question certains choix de modélisation du système, de formalisation des alternatives conçues, et demander à ce que de nouveaux indicateurs soient calculés. Je note cependant ici une faiblesse importante du dispositif d'évaluation que je délivre à l'issue de ma thèse : le manque d'indicateurs socio-économiques. Ils sont pourtant cruciaux pour juger de la durabilité des alternatives envisagées tout particulièrement dans un contexte où la viabilité des exploitations agricoles est régulièrement remise en question. Le développement de ce type d'indicateurs avait été envisagé, même discuté avec les acteurs, mais n'ayant pas été calibrés et validés avec eux, nous avons préféré reporter la présentation des résultats d'évaluation correspondants. L'intégration de ces indicateurs est en cours dans le cadre du développement des fonctionnalités de MAELIA. Elle permettra d'assurer l'opérationnalité, l'acceptabilité et la crédibilité de la poursuite de ma démarche, il sera très important d'évaluer dans quelle mesure résoudre les problèmes de déficit en eau conduira ou non à un déficit économique au sein des exploitations.

Enfin, je pense que ma méthodologie pourrait être appliquée à d'autres problématiques de gestion des ressources naturelles dans un paysage agricole. En effet, la modélisation fine de la distribution spatiale des systèmes de culture permet d'étudier les phénomènes qui dépendent de la dynamique spatiotemporelle des pratiques agricoles et de développement des cultures au sein des paysages agricoles, comme par exemple la dynamique de certains bioagresseurs et auxiliaires de culture. Par ailleurs, je pense que mon approche de la conception via le concept de système socio-écologique peut contribuer au développement des cadres théoriques et méthodologiques de l'agronomie du territoire ciblés sur l'analyse des interactions entre dynamique des usages des ressources agricoles et naturelles, modalités de gestion de celles-ci et processus écologiques.

Bibliographie

- Abbot, J., Chambers, R., & Dunn, C. (1998). Participatory GIS: opportunity or oxymoron? *Participatory Learning and Action Series*, 33(5), 27–34.
- AGPM - Association Générale des Producteurs de Maïs. (2014, August). Newsletter économie. maiz'EUROP'.
- Alcamo, J. (2008). The SAS Approach: combining qualitative and quantitative knowledge in environmental scenarios. In J. Alcamo (Ed.), *Environmental futures: the Practice of Environmental Scenario Analysis* (pp. 123–148). Amsterdam.
- Allain, S. (2012). Négocier l'eau comme un bien commun à travers la planification concertée de bassin. *Natures Sciences Sociétés*, 20(1), 52–65. doi:10.1051/nss/2011132
- Amen, J. F., & Lhuissier, L. (2012). Détermination des volumes prélevables pour l'irrigation et gestion collective en cours de campagne : incidence des assolements et des itinéraires techniques. *Agronomie Environnement & Sociétés*, 2(2).
- Anderies, J., Janssen, M., & Ostrom, E. (2004). A framework to analyze the robustness of social-ecological systems from an institutional perspective. *Ecology and Society*, 9(1).
- Arnold, J., & Srinivasan, R. (1998). Large area hydrologic modeling and assessment part I: Model development1. *Journal of the American Water Resources Association*, 34(1), 73–89.
- Balestrat, M., & Therond, O. (2014). Enjeux de la gestion quantitative de l'eau en France - Quels données et outils de modélisation pour les institutions publiques en charge de la gestion des étiages.
- Bammer, G. (2005). Integration and implementation sciences: building a new specialization. *Ecology And Society*, 10(2).
- Barnaud, C. (2008). Équité, jeux de pouvoir et légitimité : les dilemmes d'une gestion concertée des ressources renouvelables.
- Barreteau, O., Bots, P. W. G., & Daniell, K. A. (2010). A Framework for Clarifying "Participation" in Participatory Research to Prevent its Rejection for the Wrong Reasons. *Ecology And Society*, 15(2).
- Becu, N. (2006). Identification et modélisation des représentations des acteurs locaux pour la gestion des bassins versants. hal.inria.fr. Université Montpellier II.
- Beers, P. J., Boshuizen, H. P. a., Kirschner, P. a., & Gijssels, W. H. (2006). Common Ground, Complex Problems and Decision Making. *Group Decision and Negotiation*, 15(6), 529–556. doi:10.1007/s10726-006-9030-1
- Benoît, M., Rizzo, D., Marraccini, E., Moonen, A. C., Galli, M., Lardon, S., ... Bonari, E. (2012). Landscape agronomy: a new field for addressing agricultural landscape dynamics. *Landscape Ecology*, 27(10), 1385–1394. doi:10.1007/s10980-012-9802-8
- Bergez, J.-E., Kuiper, M., Therond, O., Taverne, M., Belhouchette, H., & Wery, J. (2010). Evaluating integrated assessment tools for policy support. In F. Brouwer (Ed.), *Environmental and agricultural modelling: integrated approaches for policy impact assessment* (pp. pp. 237–256). Berlin, DEU: Springer Netherlands.
- Bonin, M., Thinon, P., Caron, P., Cheylan, J., & Clouet, Y. (2001). Territoire, zonage et modélisation graphique : recherche-action et apprentissage / Territory, zoning and graph modelling : concerted applied research and training. *Géocarrefour*, 76(3), 241–252. doi:10.3406/geoca.2001.2562

- Bots, P. W. G., & Daalen, C. E. (2008). Participatory Model Construction and Model Use in Natural Resource Management: a Framework for Reflection. *Systemic Practice and Action Research*, 21(6), 389–407. doi:10.1007/s11213-008-9108-6
- Bousquet, F., Barreteau, O., Page, C. Le, Mullon, C., & Weber., J. (1999). An environmental modelling approach: the use of multi-agent simulations. In F. Blasco & A. Weill (Eds.), *Advances in environmental and ecological modelling* (pp. 113–122).
- Brun, A. (2003). Aménagement et gestion des eaux en France : l'échec de la politique de l'eau face aux intérêts du monde agricole. *VertigO - Revue En Ligne*, 4.
- Buller, H. (2009). The lively process of interdisciplinarity. *Area*, 41(4), 395–403. doi:10.1111/j.1475-4762.2008.00856.x
- Bürgi, M., Hersperger, A. M., & Schneeberger, N. (2004). Driving forces of landscape change – current and new directions. *Landscape Ecology*, 19(8), 857–868. doi:10.1007/s10980-004-0245-8
- Caron, P. (2005). À quels territoires s'intéressent les agronomes? Le point de vue d'un géographe tropicaliste. *Natures Sciences Sociétés*, 13(2), 145–153. doi:10.1051/nss
- Caron, P., & Cheylan, J. (2005). Donner sens à l'information géographique pour accompagner les projets de territoire: cartes et représentations spatiales comme supports d'itinéraires croisés. *Géocarrefour*, 80(2005), 111–122.
- Cash, D. W., Clark, W. C., Alcock, F., Dickson, N. M., Eckley, N., Guston, D. H., ... Mitchell, R. B. (2003). Knowledge systems for sustainable development. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(14), 8086–91. doi:10.1073/pnas.1231332100
- Cash, D., Clark, W., Alcock, F., Eckley, N., Jäger, J., & Kennedy, J. F. (2002). Saliency, Credibility, Legitimacy and Boundaries: Linking Research, Assessment and Decision Making. *KSG Working Papers Series RWP02-046*, (November). doi:http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.372280
- Castellazzi, M., Matthews, J., Angevin, F., Sausse, C., Wood, G. a. A., Burgess, P. J. J., ... Perry, J. N. N. (2010). Simulation scenarios of spatio-temporal arrangement of crops at the landscape scale. *Modelling & Software*, 25(12), 1881–1889. doi:10.1016/j.envsoft.2010.04.006
- Chambers, R. (2006). Participatory mapping and geographic information systems: whose map? Who is empowered and who disempowered? Who gains and who loses? *The Electronic Journal of Information Systems in ...*, 1–11.
- Checkland, P. B. (1981). *System thinking, system practice*. Chichester.
- Clavel, L. (2010). Développement d'une méthode de construction et d'évaluation de scénarios portant sur la distribution des systèmes de cultures de grands territoires - Application à la demande en eau dans le système Neste.
- Clavel, L., Soudais, J., Baudet, D., & Leenhardt, D. (2011). Integrating expert knowledge and quantitative information for mapping cropping systems. *Land Use Policy*, 28(1), 57–65. doi:10.1016/j.landusepol.2010.05.001
- Comité de Bassin Adour-Garonne. (2009). *Schéma directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux du Bassin Adour Garonne*.
- Constantin, J., Willaume, M., Murgue, C., Lacroix, B., & Therond, O. (2015). The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 206, 55–68. doi:10.1016/j.agrformet.2015.02.011

- Danel, J. B. (2011). Conséquences sur les filières agricoles et agroalimentaires de l'atteinte des objectifs quantitatifs de la Directive cadre sur l'eau et du SDAGE dans le bassin Adour-Garonne - Rapport CGAAER n° 10181 (p. 38p.).
- Darnhofer, I., Gibbon, D., Dedieu, B., & Editors, D. (2012). *Farming Systems Research into the 21st century.* (I. Darnhofer, M. Gibbons, & B. Dedieu, Eds.) (p. 499). Springer.
- Darshana, Pandey, A., Ostrowski, M., & Pandey, R. P. (2012). Simulation and Optimization for Irrigation and Crop Planning. *Irrigation and Drainage*, 61(2), 178–188. doi:10.1002/ird.633
- Daubas, M., & Dupuis, C. (2009). Détermination des volumes prelevables initiaux (Vpi) sur le bassin de l'Aveyron (pp. 1–21).
- Debolini, M., Marraccini, E., Rizzo, D., Galli, M., & Bonari, E. (2013). Mapping local spatial knowledge in the assessment of agricultural systems: A case study on the provision of agricultural services. *Applied Geography*, 42, 23–33. doi:10.1016/j.apgeog.2013.04.006
- Debril, T., & Therond, O. (2013). Les difficultés associées à la gestion quantitative de l'eau et à la mise en œuvre de la réforme des volumes prélevables : le cas du bassin Adour- Garonne. *Agronomie Environnement & Sociétés*, 2(2), 11.
- Denzin, N. K. (1978). *The research act: A theoretical introduction to sociological methods.* New York: McGraw-Hill.
- Dunn, C. E. (2007). Participatory GIS : a people's GIS ? *Progress in Human Geography*, 31(5), 616–637.
- Dury, J., Garcia, F., Reynaud, A., & Therond, O. (2010). Modelling the Complexity of the Cropping Plan. In D. A. Swayne, Y. Wanhong, A. A. Voinov, A. Rizzoli, & T. Filatova (Eds.), *International Environmental Modelling and Software Society (iEMSs) 2010 International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment's Sake.* Ottawa, Canada.
- Dziegielewska, B. (1999). The Role of Desalination in Averting a Global Water Crisis. *Water International*, 24(4).
- Dziegielewska, B. (2003). Strategies for managing water demand. *Water Resources Update*, 29–39.
- EC - European Community. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2000 establishing a framework for Community action in the field of water. policy. Off. J. Eur. Comm. (2000) L 327/1-72 (2000). policy. Off. J. Eur. Comm.
- EEA - European Environment Agency. (2012). *Territorial cohesion and water management in Europe: the spatial perspective.* EEA technical report (Vol. 4). doi:10.2800/49764
- Ewert, F., van Ittersum, M. K., Bezlepina, I., Therond, O., Andersen, E., Belhouchette, H., ... Wolf, J. (2009). A methodology for enhanced flexibility of integrated assessment in agriculture. *Environmental Science & Policy*, 12(5), 546–561. doi:10.1016/j.envsci.2009.02.005
- Ewert, F., van Ittersum, M. K., Heckeley, T., Therond, O., Bezlepina, I., & Andersen, E. (2011). Scale changes and model linking methods for integrated assessment of agri-environmental systems. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 142(1-2), 6–17. doi:10.1016/j.agee.2011.05.016
- Fernandez, S., & Trottier, J. (2012). La longue construction du débit d'étiage : l'odyssée d'une métamorphose (la gestion des cours d'eau du bassin Adour-Garonne). In Q. Éd. (Ed.), *Nouveaux rapports à la nature dans les campagnes* (pp. 153–190). Versailles.
- Fischer, G., Giaccardi, E., Eden, H., Sugimoto, M., & Ye, Y. (2005). Beyond binary choices: Integrating individual and social creativity. *International Journal of Human-Computer Studies*, 63(4-5), 482–512. doi:10.1016/j.ijhcs.2005.04.014

- Funtowicz, S., & Ravetz, J. (1993). Science for the post-normal age. *Futures*, (September), 739–755.
- Funtowicz, S., & Ravetz, J. (2003). Post-Normal Science. *International Society for Ecological Economics*, 1–10.
- Gandolfi, J. M. (1997). Connaissance, évaluation, et protection des aquifères alluviaux du Tarn-et-Garonne - R39543. Toulouse: Bureau de Recherches Géologiques et Minières.
- Gaucherel, C., Houllier, F., Auclair, D., & Houet, T. (2014). Dynamic Landscape Modelling: The Quest for a Unifying Theory. *Living Reviews in Landscape Research*, 8. doi:10.12942/lrlr-2014-2
- Gaudou, B., Sibertin-blanc, C., Therond, O., Amblard, F., Arcangeli, J., Balestrat, M., ... Taillandier, P. (2013). The MAELIA multi-agent platform for integrated assessment of low-water management issues. In *MABS 2013 - 14th International Workshop on Multi-Agent-Based Simulation* (pp. 1–12). Saint Paul, Minnesota.
- Gaulupeau, M. (2010). La gestion quantitative de l'eau agricole dans le bassin Adour- Garonne, au travers des représentations de ses acteurs. Recherche. INP ENSAT.
- Gehlé, V. (2012). Soutien d'étiage et arrêtés de restrictions: les modalités de gestion de crise de l'eau sur le bassin versant de l'Aveyron. INP ENSAT.
- Giampietro, M. (2002). Complexity and scales: the challenge for integrated assessment. *Integrated Assessment*, 3, 247–265.
- Gleick, P. H. (2003). Water Use. *Annual Review of Environment and Resources*, 28, 275–314.
- Gober, P., Larson, K., Quay, R., Polsky, C., Chang, H., & Shandas, V. (2013). Why Land Planners and Water Managers Don't Talk to One Another and Why They Should! *Society & Natural ...*, 26(3), 356–364. doi:10.1080/08941920.2012.713448
- Golspinck, C. (2002). Methodological Implications Of Complex Systems Approaches to Sociality: Simulation as a foundation for knowledge. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation*, 5(1).
- Grimm, V., & Railsback, S. F. (2012). Pattern-oriented modelling: a “multi-scope” for predictive systems ecology. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B, Biological Sciences*, 367(1586), 298–310. doi:10.1098/rstb.2011.0180
- Guy, S. (1996). Managing Water Stress: The Logic of Demand Side Infrastructure Planning. *Journal of Environmental Planning and Management*, 39, 123–130.
- Hanafi, S., Mailhol, J. C., Poussin, J. C., & Zairi, a. (2012). Estimating Water Demand At Irrigation Scheme Scales Using Various Levels of Knowledge: Applications in Northern Tunisia. *Irrigation and Drainage*, 61(3), 341–347. doi:10.1002/ird.652
- Hatchuel, A. (2001). The Two Pillars of New Management Research. *British Journal of Management*, 12(s1), S33–S39. doi:10.1111/1467-8551.12.s1.4
- Hatchuel, A. (2002). Towards Design Theory and expandable rationality : The unfinished program of Herbert Simon. *Journal of Management and Governance*, 5(3-4), 1–12.
- Hatchuel, A., & Weil, B. (2002). La théorie CK: Fondements et usages d'une théorie unifiée de la conception. In *Colloque “science de la conception”* (pp. 1–24). Lyon, France.
- Hatchuel, A., & Weil, B. (2003). A new approach of innovative design: an introduction to C-K theory. In *International conference on engineering design (ICED)* (pp. 109–124). Stockholm, Sweden.
- Hollnagel, E. (Ed.). (2003). *Handbook of Cognitive Task Design*. Routledge.

- Houet, T., Schaller, N., Castets, M., & Gaucherel, C. (2014). Improving the simulation of fine-resolution landscape changes by coupling top-down and bottom-up land use and cover changes rules. *International Journal of Geographical Information Science*, 00(00), 1–29. doi:10.1080/13658816.2014.900775
- IAASTD - International Assessment of Agricultural knowledge Science and Technology for Development. (2009). *Agriculture at a Crossroads: Synthesis Report*.
- Inan, H. I., Sagris, V., Devos, W., Milenov, P., van Oosterom, P., & Zevenbergen, J. (2010). Data model for the collaboration between land administration systems and agricultural land parcel identification systems. *Journal of Environmental Management*, 91(12), 2440–54. doi:10.1016/j.jenvman.2010.06.030
- Ison, R. (2008). Systems thinking and practice for action research. In P. W. Reason & H. Bradbury (Eds.), *The Sage Handbook of Action Research Participative Inquiry* (pp. 139–158). London, UK: Sage publication.
- Ittersum, M. Van, & Rabbinge, R. (1997). Concepts in production ecology for analysis and quantification of agricultural input-output combinations. *Field Crops Research*, 52, 197–208.
- Jakeman, A. J., & Letcher, R. A. (2003). Integrated assessment and modelling : features , principles and examples for catchment management. *Environmental Modelling & Software*, 18, 491–501. doi:10.1016/S1364-8152(03)00024-0
- Jakeman, A., Letcher, R., & Norton, J. (2006). Ten iterative steps in development and evaluation of environmental models. *Environmental Modelling & Software*, 21(5), 602–614. doi:10.1016/j.envsoft.2006.01.004
- Jakku, E., & Thorburn, P. J. (2010). A conceptual framework for guiding the participatory development of agricultural decision support systems. *Agricultural Systems*, 103(9), 675–682. doi:10.1016/j.agsy.2010.08.007
- Jansen, H. G. P., & Stoorvogel, J. J. (1998). Quantification of Aggregation Bias in Regional Agricultural Land Use Models : Application to Guacimo contry, Costa Rica. *Agricultural Systems*, 58(3), 417–439.
- Janssen, S., Andersen, E., Athanasiadis, I. N., & van Ittersum, M. K. (2009). A database for integrated assessment of European agricultural systems. *Environmental Science & Policy*, 12(5), 573–587. doi:10.1016/j.envsci.2009.01.007
- Jick, T. D. (1979). Mixing Qualitative and Quantitative Methods: Triangulation in action. *Administrative Science Quarterly*, 24(4).
- Kallis, G., & Coccossis, H. (2003). Managing Water for Athens: From the Hydraulic to the Rational Growth Paradigm. *European Planning Studies*, 11(3), 245–261. doi:10.1080/09654310303633
- Lang Delus, C. (2011). Environnement, Nature, Paysage. *Environnement, Nature, Paysage*, (571), 1–22.
- Lardon, S., Caron, P., & Cheylan, J. (2012). Donner sens à l'information géographique pour accompagner les projets de territoire : cartes et représentations spatiales comme supports d'itinéraires croisés. *Géocarrefour*, 80(2005).
- Lardon, S., Moonen, A.-C., Marraccini, E., Debolini, M., Mariassunta, G., & Loudiyi, S. (2012). The Territory Agronomy Approach in research, education, and training. In I. Darnhofer, D. Gibbon, & B. Dedieu (Eds.), *Farming system research into the 21st century: the new dynamic* (pp. 257–282). Springer.
- Lardy, R., Mazzega, P., Sibertin-Blanc, C., Auda, Y., Sanchez-Perez, J.-M., Sauvage, S., & Therond, O. (2014). Calibration of simulation platforms including highly interweaved processes: the MAELIA multi-agent platform. In D. P. Ames, N. W. T. Quinn, & A. Rizzoli (Eds.), *7th International Congress on Environmental Modelling and Software*. San Diego, CA, USA.

- Larsen, R. K., Swartling, Å. G., Powell, N., May, B., Plummer, R., Simonsson, L., & Osbeck, M. (2012). A framework for facilitating dialogue between policy planners and local climate change adaptation professionals: Cases from Sweden, Canada and Indonesia. *Environmental Science & Policy*, 23, 12–23. doi:10.1016/j.envsci.2012.06.014
- Latour, B. (2005). *Reassembling the social: an introduction to Actor–Network Theory* (Oxford Uni.). Oxford, UK.
- Leenhardt, D., Angevin, F., Biarnès, A., Colbach, N., & Mignolet, C. (2010). Describing and locating cropping systems on a regional scale. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 30(1), 131–138. doi:10.1051/agro/2009002
- Leenhardt, D., Therond, O., & Mignolet, C. (2012). L'asolement du point de vue du territoire et des filières. *Agronomie Environnement & Sociétés*, 2(2).
- Leenhardt, D., Therond, O., Cordier, M.-O., Gascuel-Oudou, C., Reynaud, A., Durand, P., ... Moreau, P. (2012). A generic framework for scenario exercises using models applied to water-resource management. *Environmental Modelling & Software*, 37, 125–133. doi:10.1016/j.envsoft.2012.03.010
- Leigh Star, S. (2010). This is Not a Boundary Object: Reflections on the Origin of a Concept. *Science, Technology & Human Values*, 35(5), 601–617. doi:10.1177/0162243910377624
- Letcher, R. a., Croke, B. F. W., & Jakeman, a. J. (2007). Integrated assessment modelling for water resource allocation and management: A generalised conceptual framework. *Environmental Modelling & Software*, 22(5), 733–742. doi:10.1016/j.envsoft.2005.12.014
- Levy, J., Bertin, M., Combes, B., Mazodier, J., & Roux, A. (2005). *Irrigation durable - Rapport CGGREF 2185* (p. 38 pp + annexes.).
- Lewin, K. (1946). Action Research and Minority Problems. *Journal of Social Issues*, 2(4), 34–46. doi:10.1111/j.1540-4560.1946.tb02295.x
- List, D. (2006). Action research cycles for multiple futures perspectives. *Futures*, 38(6), 673–684. doi:10.1016/j.futures.2005.10.001
- Liu, Y., Gupta, H., Springer, E., & Wagener, T. (2007). Linking science with environmental decision making: Experiences from an integrated modeling approach to supporting sustainable water resources management. *Environmental Modelling & Software*, 23, 846–858. doi:10.1016/j.envsoft.2007.10.007
- Madrid, C., Cabello, V., & Giampietro, M. (2013). Water-Use Sustainability in Socioecological Systems: A Multiscale Integrated Approach. *BioScience*, 63(1), 14–24. doi:10.1525/bio.2013.63.1.6
- Martin, G., Martin-Clouaire, R., & Duru, M. (2012). Farming system design to feed the changing world. A review. *Agronomy for Sustainable Development*, 33(1), 131–149. doi:10.1007/s13593-011-0075-4
- Martin, P. (2013). « La gestion quantitative de l'eau en agriculture ».
- Maton, L., Leenhardt, D., & Bergez, J. (2007). Geo-referenced indicators of maize sowing and cultivar choice for better water management. *Agronomy for Sustainable Development*, 27, 377–386.
- Maton, L., Leenhardt, D., Goulard, M., & Bergez, J. (2005). Assessing the irrigation strategies over a wide geographical area from structural data about farming systems. *Agricultural Systems*, 86(3), 293–311. doi:10.1016/j.agsy.2004.09.010
- Mayor, E., Sibertin-blanc, C., Therond, O., Debril, T., Panzoli, D., Vavasseur, M., & Mazzega, P. (2012). Formal Representation of Water Withdrawal Policies for Integrated Impact Assessment. In T. Gilbert & G. Nicolis (Eds.), *European Conference on Complex Systems*. Bruxelles: Springer.

- Mazzege, P., Therond, O., Debril, T., March, H., Sibertin-blanc, C., Lardy, R., & Sant'Ana, D. (2014). Critical Multi-level Governance Issues of Integrated Modelling: An Example of Low-Water Management in the Adour-Garonne Basin (France). *Journal of Hydrology*, in Press.
- McCall, M. K., & Dunn, C. E. (2012). Geo-information tools for participatory spatial planning: Fulfilling the criteria for “good” governance? *Geoforum*, 43(1), 81–94. doi:10.1016/j.geoforum.2011.07.007
- MEEDDTL - Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du D. durable et de l'Aménagement du territoire, & MAAPRAT. (2011). Plan d'adaptation de la gestion de l'eau - soutiens à la création de retenues d'eau et à l'adaptation des cultures.
- MEEDDTL - Ministère de l'Écologie, de l'Énergie, du D. durable et de l'Aménagement du territoire. (2009). La loi sur l'eau et les milieux aquatiques du 30 décembre 2006. Retrieved from www.eaufrance.fr
- MEEDDTL. Plan national d'adaptation aux effets du changement climatique (2011).
- Meinke, H., Howden, S. M., Struik, P. C., Nelson, R., Rodriguez, D., & Chapman, S. C. (2009). Adaptation science for agriculture and natural resource management—urgency and theoretical basis. *Current Opinion in Environmental Sustainability*, 1(1), 69–76. doi:10.1016/j.cosust.2009.07.007
- Mignolet, C., Schermann, N., Pietro, F. Di, Pons, Y., Gaucherel, C., Viaud, V., ... Di Pietro, F. (2009). The contribution of crop-rotation organization in farms to crop-mosaic patterning at local landscape scales. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 131(3-4), 207–219. doi:10.1016/j.agee.2009.01.015
- Mishra, A. K., & Singh, V. P. (2010). A review of drought concepts. *Journal of Hydrology*, 391(1-2), 202–216. doi:10.1016/j.jhydrol.2010.07.012
- Murgue, C., Therond, O., & Leenhardt, D. (2014a). Hybridizing local and generic information to model cropping system spatial distribution in an agricultural landscape. *Agricultural Systems*, [SUBMITTED].
- Murgue, C., Therond, O., & Leenhardt, D. (2014b). Agricultural viability in a water-deficit basin : can participatory modelling and design activities trigger collaboration between water management and agriculture stakeholders ? In H. Schobert, M.-C. Riecher, H. Fischer, T. Aenis, & A. Knierim (Eds.), 11th European IFSA Symposium: Farming systems facing global challenges: Capacities and strategies. Berlin, Berlin, Germany.
- Murgue, C., Lardy, R., Vavasseur, M., Leenhardt, D., & Therond, O. (2014c). Fine spatio-temporal simulation of cropping and farming systems effects on irrigation withdrawal dynamics within a river basin. In D. P. Ames, N. W. T. Quinn, & A. E. Rizzoli (Eds.), 7th International Congress on Environmental Modelling and Software. San Diego.
- Murgue, C., Therond, O., & Leenhardt, D. (2015). Towards sustainable water and agricultural land management: participatory design of social-agro-hydrological systems. *Land Use Policy*, 45, 52–63. doi:10.1016/j.landusepol.2015.01.011
- Narcy, J. B. (2004). Pour une gestion spatiale de l'eau : comment sortir du tuyau ? (p.i.e – Peter Lang, Ed.) (Collection., p. 342 p.). Bruxelles.
- Narcy, J., & Mermet, L. (2003). Nouvelles justifications pour une gestion spatiale de l'eau. *Natures Sciences Sociétés*, 11, 135–145. doi:10.1016/S1240-1307(03)00043-8
- Nassauer, J. I., & Opdam, P. (2008). Design in science: extending the landscape ecology paradigm. *Landscape Ecology*, 23(6), 633–644. doi:10.1007/s10980-008-9226-7
- 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(6), 381–387. doi:10.1007/s11213-008-9112-x

- Nowotny, H., Scott, P., & Gibbons, M. (2001). *Re-thinking science: knowledge and the public in an age of uncertainty*. Cambridge: Polity press.
- OECD - Organisation for Economic Cooperation and Development. (2009). *Farmland conversion. The spatial dimension of agricultural and land-use policies*. Paris.
- Olsson, J. A., & Andersson, L. (2007). Possibilities and problems with the use of models as a communication tool in water resource management. *Water Resources Management*, 21(1), 97–110. doi:10.1007/s11269-006-9043-1
- Ostrom, E. (2009). A general framework for analyzing sustainability of social-ecological systems. *Science* (New York, N.Y.), 325(5939), 419–22. doi:10.1126/science.1172133
- Overmars, K., Verburg, P., & 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(3), 584–599. doi:10.1016/j.landusepol.2005.09.008
- Oxley, T., McIntosh, B., Winder, N., Mulligan, M., & Engelen, G. (2004). Integrated modelling and decision-support tools: a Mediterranean example. *Environmental Modelling & Software*, 19(11), 999–1010. doi:10.1016/j.envsoft.2003.11.003
- Paassen, A. Van. (2004). Bridging the gap: computer model enhanced learning about natural resource management in Burkina Faso. *Tropical Resource Management Papers*, 49.
- Pagnol, H. (2013). *l'avis sur l'eau voté malgré l'opposition du groupe agricole*. Association Générale des Producteurs de Blé et autres Céréales. Retrieved April 26, 2013, from <http://www.agpb.fr/cotations-a-depeches/depeches-du-jour/>
- Pahl-Wostl, C. (2007). Transitions towards adaptive management of water facing climate and global change. *Water Resources Management*, 21(1), 49–62. doi:10.1007/s11269-006-9040-4
- Pahl-Wostl, C., & Hare, M. (2004). Processes of social learning in integrated resources management. *Journal of Community & Applied Social Psychology*, 14(3), 193–206. doi:10.1002/casp.774
- Pahl-Wostl, C., Giupponi, C., Richards, K., Binder, C., de Sherbinin, A., Sprinz, D., ... van Bers, C. (2013). Transition towards a new global change science: Requirements for methodologies, methods, data and knowledge. *Environmental Science & Policy*, 28, 36–47. doi:10.1016/j.envsci.2012.11.009
- Pérez, A. J., Abrahão, R., Causapé, J., Cirpka, O. a., & Bürger, C. M. (2011). Simulating the transition of a semi-arid rainfed catchment towards irrigation agriculture. *Journal of Hydrology*, 409(3-4), 663–681. doi:10.1016/j.jhydrol.2011.08.061
- Raymond, C. M., Fazey, I., Reed, M. S., Stringer, L. C., Robinson, G. M., & Evely, A. C. (2010). Integrating local and scientific knowledge for environmental management. *Journal of Environmental Management*, 91(8), 1766–77. doi:10.1016/j.jenvman.2010.03.023
- Reed, M. (2008). Stakeholder participation for environmental management: A literature review. *Biological Conservation*, 141(10), 2417–2431. doi:10.1016/j.biocon.2008.07.014
- Rounsevell, M. D. a., Pedrolí, B., Erb, K.-H., Gramberger, M., Busck, A. G., Haberl, H., ... Wolfslehner, B. (2012). Challenges for land system science. *Land Use Policy*, 29(4), 899–910. doi:10.1016/j.landusepol.2012.01.007
- Sadeghi, S., Jalili, K., & Nikkami, D. (2009). Land use optimization in watershed scale. *Land Use Policy*, 26(2), 186–193. doi:10.1016/j.landusepol.2008.02.007
- Sagris, V. (2013). *Land Parcel Identification System conceptual model: development of geoinfo community conceptual model*. University of Tartu.

- Salmon-Monviola, J., Durand, P., Ferchaud, F., Oehler, F., & Sorel, L. (2012). Modelling spatial dynamics of cropping systems to assess agricultural practices at the catchment scale. *Computers and Electronics in Agriculture*, 81, 1–13. doi:10.1016/j.compag.2011.10.020
- Salter, J., Robinson, J., & Wiek, A. (2010). Participatory methods of integrated assessment-a review. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 1(5), 697–717. doi:10.1002/wcc.73
- Saqalli, M., Caron, P., Defourny, P., & Issaka, A. (2009). The PBRM (perception-based regional mapping): A spatial method to support regional development initiatives. *Applied Geography*, 29(3), 358–370. doi:10.1016/j.apgeog.2008.11.003
- Savenije, H., & Zaag, P. Van Der. (2002). Water as an economic good and demand management paradigms with pitfalls. *Water International*, 27(1), 98–104.
- Schraagen, J. M., Chipman, S. F., & Shalin, V. L. (Eds.). (2000). *cognitive task analysis* (Taylor and.). Lawrence Erlbaum Associates, Inc.
- Sebillote, M. (1990). Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. In P. D. Combe L (Ed.), *Les systèmes de culture*. (Inra édit., pp. 165–196). Paris.
- Shi, X., Long, R., Dekett, R., & Philippe, J. (2009). Integrating Different Types of Knowledge for Digital Soil Mapping. *Soil Science Society of America Journal*, 73(5), 1682. doi:10.2136/sssaj2007.0158
- Star, S., & Griesemer, J. (1989). Institutional ecology, “translations” and boundary objects: Amateurs and professionals in Berkeley’s Museum of Vertebrate Zoology; 1907-39. *Social Studies of Science*, 19(3), 387–420.
- Sterk, B., Leeuwis, C., & Vanittersum, M. (2009). Land use models in complex societal problem solving: Plug and play or networking? *Environmental Modelling & Software*, 24(2), 165–172. doi:10.1016/j.envsoft.2008.07.001
- Stirling, A. (2006). Analysis, participation and power: justification and closure in participatory multi-criteria analysis. *Land Use Policy*, 23(1), 95–107. doi:10.1016/j.landusepol.2004.08.010
- Studer, R., Benjamins, V., & Fensel, D. (1998). Knowledge engineering: principles and methods. *Data & Knowledge Engineering*, 25, 161–197.
- Teyssier, F. (2006). es consommations d’eau pour l’irrigation en Midi-Pyrénées. Surfaces irriguées et volumes d’eau consommés. Rapport avec le climat, la PAC, les ressources sur la période 2001-2005. *Water Supply* (p. 42p.).
- Therond, O., Belhouchette, H., Janssen, S., Louhichi, K., Ewert, F., Bergez, J.-E., ... Van Ittersum, M. (2009). Methodology to translate policy assessment problems into scenarios: the example of the SEAMLESS integrated framework. *Environmental Science & Policy*, 12(5), 619–630. doi:10.1016/j.envsci.2009.01.013
- Therond, O., Hengsdijk, H., Casellas, E., Wallach, D., Adam, M., Belhouchette, H., ... 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*, 142(1-2), 85–94. doi:10.1016/j.agee.2010.05.007
- Therond, O., Sibertin-blanc, C., Lardy, R., Balestrat, M., Hong, Y., Louail, T., ... Mazzega, P. (2014). Integrated modelling of social-ecological systems : The MAELIA high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems. In D. P. Ames, N. W. T. Quinn, & A. E. Rizzoli (Eds.), *7th Int. Congress on Env. Modelling and Software*. San Diego.

- Tittonell, P. A. (2013). Farming Systems Ecology: Inaugural lecture upon taking up the position of Chair in Farming Systems Ecology at Wageningen University on 16 May 2013. Wageningen.
- Todorovic, M. (2003). A GIS for irrigation management. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28(4-5), 163–174. doi:10.1016/S1474-7065(03)00023-8
- Tress, G., Tress, B., & Fry, G. (2005). Clarifying Integrative Research Concepts in Landscape Ecology. *Landscape Ecology*, 20(4), 479–493. doi:10.1007/s10980-004-3290-4
- van Asselt Marjolein, B. A., & Rijkens-Klomp, N. (2002). A look in the mirror : reflection on participation in Integrated Assessment from a methodological perspective. *Global Environmental Change*, 12, 167–184.
- van Berkel, D. B., & Verburg, P. H. (2011). Sensitising rural policy: Assessing spatial variation in rural development options for Europe. *Land Use Policy*, 28(3), 447–459. doi:10.1016/j.landusepol.2010.09.002
- Vanclay, F. (2004). Social principles for agricultural extension to assist in the promotion of natural resource management. *Australian Journal of Experimental Agriculture*, 44, 213–223.
- 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(3), 391–405. doi:10.1007/s00267-002-2630-x
- Verburg, P. H., van de Steeg, J., Veldkamp, a, & Willemen, L. (2009). From land cover change to land function dynamics: a major challenge to improve land characterization. *Journal of Environmental Management*, 90(3), 1327–35. doi:10.1016/j.jenvman.2008.08.005
- Vinck, D. (1999). Les objets intermédiaires dans les réseaux de coopération scientifique: Contribution à la prise en compte des objets dans les dynamiques sociales. *Revue Française de Sociologie*, 40(2), 385. doi:10.2307/3322770
- Voinov, A. (2010). “Integronsters” and the special role of data. In 2010 International Congress on Environmental Modelling and Software Modelling for Environment’s Sake, Fifth Biennial Meeting. Ottawa, Canada: International Environmental Modelling and Software Society.
- World Commission on Dams. (2000). *Dams and Development, a new framework for decision-making*. Sterling, VA, USA.
- Wriedt, G., Van der Velde, M., Aloe, A., & Bouraoui, F. (2009). Estimating irrigation water requirements in Europe. *Journal of Hydrology*, 373(3-4), 527–544. doi:10.1016/j.jhydrol.2009.05.018
- Yeager, C. D., & Steiger, T. (2013). Applied geography in a digital age: The case for mixed methods. *Applied Geography*, 39, 1–4. doi:10.1016/j.apgeog.2012.12.00

Table des Illustrations

Figure 1 : Représentation cartographique de la distribution spatiale des pratiques de rotation des cultures à l’aval de l’Aveyron, issue de l’hybridation de l’information du RPG et des connaissances expertes locales.....	3
Figure 2 : Zones de Répartition des Eaux des Eaux Superficielles et Souterraines – Juin 2012. © UMR AGIR/ONEMA (Balestrat & Therond, 2014)	7
Figure 3 : évolution des surfaces irriguées au sein du bassin Adour Garonne (BAG), des régions Midi-Pyrénées (bleu), Aquitaine (orange) et de la part de la région Poitou Charente incluse dans le BAG (gris) entre 1988 et 2010 en millier d’hectare (Source IFEN 2012 et AGRESTE 2012)	8
Figure 4 : (a) écart entre volumes prélevables initiaux et volumes prélevés pour l’irrigation en année hydrologique quinquennale sèche et (b) Niveau de réduction des volumes prélevables définitifs par rapport aux volumes historiquement autorisés (source DREAL Midi-Pyrénées).....	9
Figure 5 : Éléments clefs d’une pensée systémique dans des situations qui apparaissent complexes (Ison, 2008)	17
Figure 6 : The conceptual model of agricultural landscape dynamics (ALaDyn), structuring the relationships between natural resources, landscape patterns, and farming practices (Benoît et al., 2012)	19
Figure 7 : Représentation du flux d’information possible dans un collectif pour un dispositif de recherche participative: R <i>Researcher</i> , M <i>Model</i> , P <i>Policy maker</i> , S <i>Stakeholder</i>). Dans Barreteau et al. (2010).....	22
Figure 8 : Design as a link between science and landscape change (Nassauer & Opdam, 2008)	23
Figure 9 : Etape 1 de la démarche de conception-évaluation mise en œuvre.....	25
Figure 10 : Etape 2 de la démarche de conception-évaluation mise en œuvre.....	25
Figure 11 : Etape 3 de la démarche de conception-évaluation mise en œuvre.....	26
Figure 12 : Localisation et présentation du territoire irrigué à l’aval de l’Aveyron	27
Figure 13 : Photo prise lors d’un atelier de conception à la DDT 82	29
Figure 14. Location and land-use map of the case study (downstream of the Aveyron River basin) located in the Adour-Garonne basin (southwestern France).	32
Figure 15. Key information provided by the French “Land Parcel Identification System” (LPIS) geographic database, and corresponding terminology used in this article.....	36
Figure 16. Summary of the methodological path followed to hybridize generic information and local knowledge in the Cropping System Spatial Distribution (CSSD) method (CLC: Corine Land Cover, LPIS: Land Parcel Identification System)..	38
Figure 17. UML activity diagram of a crop management strategy for maize monocropping formalized from outputs of a directed interview with a farmer (Phase 4).	42
Figure 18: Main outcomes of participatory mapping workshop for soils: participants use geographic and parametric descriptions to refine the generic soil map.....	44
Figure 19. Main outcomes of participatory mapping workshop concerning cropping systems (Phase 3): (a) the main cropping systems (CS) and their main determinants, (b) Formalized map of areas considered as homogeneous in terms of main CS and their description.....	45
Figure 20. Summary view of the formal representation of cropping system spatial distribution. Each field of the AL is defined by a rotation practice, soil type, irrigation equipment if irrigated and a maize cultivar type if cropped with maize.....	46

Figure 21. Observed annual withdrawals (m^3) from the local water agency database (dark gray) vs. those predicted by MAELIA (light gray) in the case study from 2003-2010.	47
Figure 22: Predicted withdrawal demand dynamics [m^3/s] (a) in 2004, for all irrigated fields (solid line) and 5-day cumulative rainfall (gray bars); (b) in 2003, for all soil types for fields connected to the Aveyron River.	49
Figure 23. Location and land-use map of the study area (downstream of the Aveyron river basin) located in the Adour-Garonne basin (southwestern France)	57
Figure 24. Key information provided by the French “Land Parcel Identification System” (LPIS) geographical database, and corresponding terminology used in this article.	58
Figure 25: Organization of the design process into four participatory sequences (i.e. objective-oriented interactions with local stakeholders) and a formalization step performed in the laboratory.....	62
Figure 26: Participatory design workshop photographs of (a) brainstorming and organization of ideas by the agricultural group (in blue: individual ideas, in red: collective naming of groups), and (b) simplified mapping to detail an option by the water and aquatic environment group.....	63
Figure 27. Location of candidate islets for alternative 1a (use early flowering maize cultivars, sown early in warmest soils to spread the peak in irrigation demand).	67
Figure 28. Location of candidate islets for alternative 4b (replacing monoculture or pseudo- monoculture maize that are irrigated from a non-recharged stream by maize/cereal rotations).	68
Figure 29: Maps of candidate and impacted fields for AltPrec and AltRot. The tables show the corresponding quantification of each alternative’s impact in the agricultural landscape for the different thresholds we tested (a percentage of candidate farms’ annual maize area)	77
Figure 30: illustration of the spatial representations for the normative and hydrological modules. The map shows the “drought sectors” used for withdrawal restrictions	81
Figure 31: Estimated annual withdrawal volumes (“Water Agency”), and simulated equivalents for the current situation, AltPrec, and AltRot.	83
Figure 32: Simulated (<i>outflow_sim</i>) and observed (<i>outflow_obs</i>) flows at Aveyron River watershed outlet. Example for 2009, logarithmic scale (base 4)	84
Figure 33: Simulated withdrawal dynamics on ZA 11 (Aveyron River) for the current situation and AltPrec. (a) Focuses on end summer dynamics while (b) focuses on the beginning of the season.....	85
Figure 34: diagrams of the simulated released volumes in for current situation and AltPrec. (a) Shows the average, (b) shows the example of year 2004.	86
Figure 35: Comparison of water balance dynamics of wheat and maize cropping in one of the impacted fields for AltRot (Jan-08 to Dec-09), estimated by the AqYield crop-soil model.....	87
Figure 36: difference (in %) of simulated outflows between AltRot _{100%} and current situation in comparison to this latter [(AltRot - CurSit)/CurSit] for the <i>Aveyron</i> river and the <i>Lère</i> river.....	88
Figure 37: Simulated Kc for all cultivars in the model, with satisfactory irrigation level. The figure shows that our parameterization figures the compensation of lower biomass production in early cultivars by higher sowing densities.	91
Figure 38 : Volumes estimés par l’agence de l’eau et volumes simulés dans la situation actuelle ; répartition des volumes simulés dans les parcelles du territoire	93

Tables des matières

Résumé.....	i
Abstract.....	i
Sommaire.....	ii
Remerciements.....	iv
Soutiens financiers.....	v
Listes d'article et de communications réalisés au cours du doctorat.....	vi
Avant-propos.....	viii
Acronymes et sigles.....	x
Introduction générale.....	1
Stratégies pour l'eau : de la gestion de l'offre à la gestion de la demande.....	1
Partie I.....	3
Présentation du projet de thèse.....	3
Le pourquoi du projet de thèse.....	4
1 La gestion quantitative de l'eau en France.....	4
1.1 Cadre légal et réglementaire de la gestion quantitative de l'eau.....	4
1.2 Les effets pervers du système mandataire.....	5
1.3 La Loi sur l'eau et les Milieux Aquatiques.....	5
2 Le bassin Adour-Garonne: des déficits qui persistent.....	6
2.1 Un bassin en déséquilibre structurel.....	6
2.2 Une profession agricole qui défend l'irrigation et revendique une gestion de l'offre.....	7
2.3 La LEMA : une révolution avortée de la gestion de l'eau dans le BAG.....	8
3 Quelle gestion quantitative de l'eau en Adour-Garonne?.....	10
3.1 Des injonctions sociétales conduisant vers une gestion spatiale de l'eau.....	10
3.2 Le rôle croissant de la profession agricole.....	10
3.3 Des spécificités spatiales et temporelles à prendre en compte.....	11
4 Enjeux pour la thèse.....	11
Le projet de thèse.....	13
1 Objectifs, questionnements et hypothèses.....	13
1.1 Objectif appliqué.....	13
1.2 Questions de recherche.....	14
2 Hypothèses de travail et choix pour le dispositif participatif.....	15
3 La posture de recherche: cadres théoriques et positionnements.....	16
3.1 Trouver une approche adaptée aux enjeux thématiques du BAG.....	16

3.2	Appréhender la complexité des territoires irrigués ?	16
3.2.1	La systémique comme épistémologie	16
3.2.2	Définir l'objet d'analyse : le système Socio-Agro-Hydrologique	17
3.2.3	Le paysage agricole pour décrire les liens entre ressources et systèmes de culture	18
3.3	Mobiliser les acteurs	20
3.3.1	Pourquoi la participation ?	20
3.3.2	Quel type de participation?	21
3.3.3	La modélisation pour outiller la participation	21
3.4	Gérer l'échange de connaissances	22
3.4.1	Une approche constructiviste	22
3.4.2	Les sciences de la conception	23
4	La démarche de conception-évaluation proposée.....	25
5	Le territoire irrigué étudié: l'Aveyron aval	26
Partie II (Articles).....		29
Les étapes de la démarche de conception évaluation		29
Etape1:Hybridizing local and generic information to model cropping system spatial distribution in an agriculture		30
Keywords.....		30
Abstract.....		30
Introduction		30
1	Material and methods.....	32
1.1	Case study	32
1.2	Sources of information.....	33
1.2.1	Local information: provided by experts and actors.....	33
1.2.2	Generic information: databases and information systems	34
1.2.3	MAELIA, a multi-agent and spatially explicit simulation platform	36
1.3	CSSD method.....	36
1.3.1	Phase 1: Case study exploration: gathering data and meeting experts	39
1.3.2	Phase 2: Building spatial and temporal foundations for CS spatialization	39
1.3.3	Phase 3: Consulting local experts to identify the main cropping systems	40
1.3.4	Phase 4: Describing CS in detail: directed interviews with farmers	40
1.3.5	Phase 5: Complementary interviews for the allocation of irrigation equipment and maize cultivar earliness	43
1.3.6	Phase 6: Using MAELIA to co-evaluate the quality of the AL model	43
2	Results	44

2.1	The AL model.....	44
2.2	Co-evaluation of the AL model using the MAELIA platform.....	46
2.2.1	Annual balance and inter-annual variability at the watershed level.....	47
2.2.2	Irrigation practices at the field level.....	47
2.2.3	Intra-seasonal dynamics of the irrigation demand.....	48
3	Discussion: a step closer to fine-scale modeling of the agricultural landscape	50
3.1	Managing the trade-off between landscape extent and representation of cropping systems	50
3.2	The challenge of modeling crop management strategies at the AL level	50
3.3	Challenges in mixing information sources.....	51
3.4	On knowledge engineering	51
	Conclusion.....	52
	Etape 2: Towards integrated water and agricultural land management. Participatory design of agricultural landscapes.....	53
	Highlights	53
	Keywords.....	53
	Abstract.....	53
	Abbreviations	54
	Introduction	54
1	Materials and methods	56
1.1	Study area	56
1.2	Collaborative representation of the current agricultural landscape.....	57
1.4	Collaborative design of alternative agricultural landscapes	60
1.4.1	Revealing stakeholders' visions.....	60
1.4.2	Formalizing options for change in the laboratory	64
2	Results.....	65
2.1	Results of the participatory workshops: ideas and options for change	65
2.1.1	The agricultural group	65
2.1.2	The WAE group.....	66
2.2	Formal and spatially explicit representation.....	66
2.2.1	Alternative 1a: spread the peak of maize irrigation needs	66
2.2.2	Alternative 4b: modification of rotations irrigated with water from non-recharged streams.....	67
2.3	Estimated potential impact of alternatives on agricultural water withdrawals.....	68
3	Discussion.....	69
3.1	Place of design step 1 the D&A methodology.....	69
3.2	Using a design approach ensures useful interactions between science and action	69

3.3	Enabling design at landscape level	70
3.4	A side effect of our approach	70
3.5	Role of alternatives	71
	Conclusion	71
Etape 3: A fine scale simulator of social-ecological system: impact assessment of cropping systems on water management		
	Keywords	72
	Acronyms	72
	Abstract	72
	Introduction	73
1	Material and Methods	74
1.1	Case study	74
1.2	Collaborative modelling of the socio-agro-hydrological system	75
1.3	Collaborative design of alternative socio-agro-hydrological systems	75
1.3.1	Co-design methodology	75
1.3.2	Alternative 1: Use early flowering cultivars, sown early ("AltPrec")	76
1.3.3	Alternative 2: limiting maize monocropping ("AltRot")	76
1.4	The MAELIA multi-agent platform	77
1.4.1	Overview	77
1.4.2	The agricultural modules	79
1.4.3	The Hydrological and normative modules	80
1.5	Calibration, Validation of and Simulation with the MAELIA platform	81
1.5.1	Overall calibration-validation approach	81
1.5.2	Calibration of the MAELIA' modules	82
1.5.3	Evaluation of the MAELIA platform	82
1.5.4	Simulations	82
2	Results	83
2.1	Evaluation of the simulation platform	83
2.2	Can the alternative on early sowing and cultivar precocity reduce end-season withdrawals?	84
2.3	Does the maize-cereal rotation alternative reduce the Aveyron River basin's deficit?	86
3	Discussion	88
3.1	Are the mainstream proposals generic solutions?	88
3.2	How else can the Alternative be used?	90
3.3	The importance of modelling choices	90
	Conclusion	91

Acknowledgments.....	92
Partie III.....	93
Discussion.....	93
Quelle connaissance scientifique?	94
1 L'importance de l'étape de représentation de la situation actuelle	94
2 Le besoin de progressivité et de répétitivité.....	95
3 L'utilité de modèles fins	96
3.1 Proposer un espace de réflexion réaliste et suffisant	96
3.3 Représenter des phénomènes émergents et pouvoir les analyser	97
3.4 Limiter les biais d'agrégation	97
4 Apports à MAELIA, apports de MAELIA.....	99
Quelle applicabilité des connaissances?	101
1 Questionner des idées reçues	101
2 Des résultats méthodologiques et thématiques transposables?	101
3 Effet de la recherche sur le terrain.....	102
Conclusion générale.....	104
Bibliographie	106
Table des Illustrations	116
Tables des matières	118

Annexes

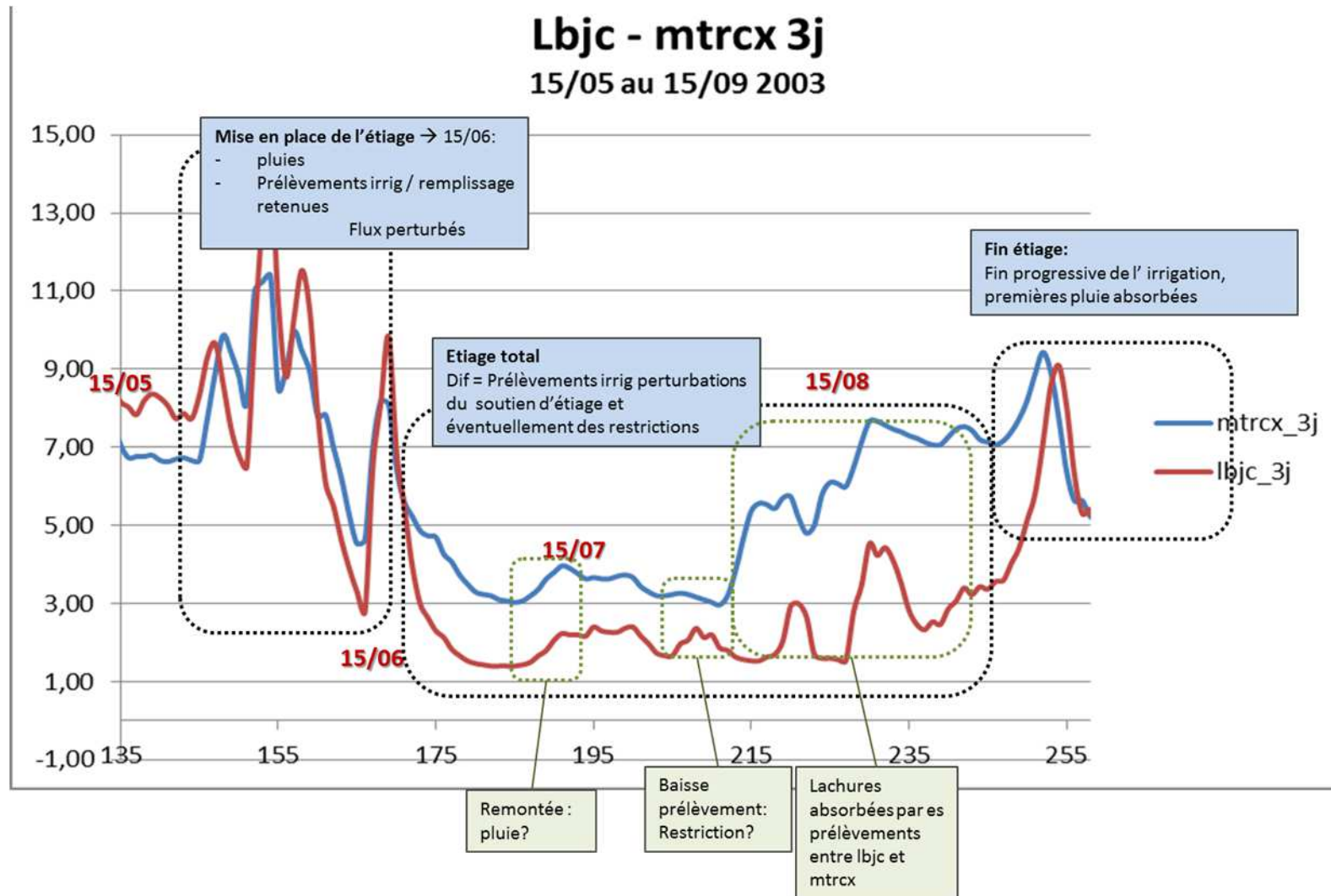
Annexes.....	123
Eléments de description du système	124
L'hydrosystème.....	124
Annexe 1 Travail participatif sur la reconstitution du débit amont.....	125
Annexe 2 Caractérisation de la sévérité de l'étiage 1969-2011.....	126
Le système agricole.....	127
Annexe 3 Caractérisation de la SAU à partir des données disponibles dans le RPG 2009.....	128
Annexe 4 Cartographie finale et paramétrage des sols pour AqYield – connaissances « hybride »	129
Annexe 5 Paramétrage des cultures dans AqYield.....	130
Annexe 6 Part des principales cultures dans la SAU des communes (RPG 2009).....	131
Annexe 7 Répartition par commune des volumes estimés prélevés par l'agence de l'eau	132
Le climat.....	133
Annexe 8 Synthèse des caractéristiques climatiques des années simulées (1/2).....	134
Annexe 9 Synthèse des caractéristiques climatiques des années simulées (2/2).....	135
Annexe 10 Paramétrage utilisé pour les cultures dans AqYield	136
Eléments de modélisation.....	137
Annexe 11 Reconstitution du débit à l'amont.....	138
Annexe 12 Calibrage de SWAT.....	141
Annexe 13 Lien hydraulique : Rapprocher ilots et ressources via les pts prélèvements.....	142
Annexe 14 Traitement des points de prélèvements et ilots, après lien hydraulique.....	145
Annexe 15 Pratiques irrigation : Priorisation ressources, gestion des restrictions.....	147
Annexe 16 Algorithme de création d'alternative en entrée de simulation	148
Validation des sorties de simulation	152
Annexe 18 Dynamiques de prélèvement	153
Annexe 19 Décalage entre AEAG et simulé.....	155
CR d'ateliers participatifs.....	157
Annexe 20 Atelier multi acteur dit « ZADA »	158
Annexe 21 Conception d'alternatives territoriales pour les systèmes de culture	174
Annexe 22 Conception d'alternatives territoriales pour les systèmes de culture	186

Eléments de description du système

L'hydrosystème

Annexe 1 Travail participatif sur la reconstitution du débit amont

Interaction avec un technicien ONEMA. En bleu le débit mesuré aval, en rouge le débit reconstitué amont

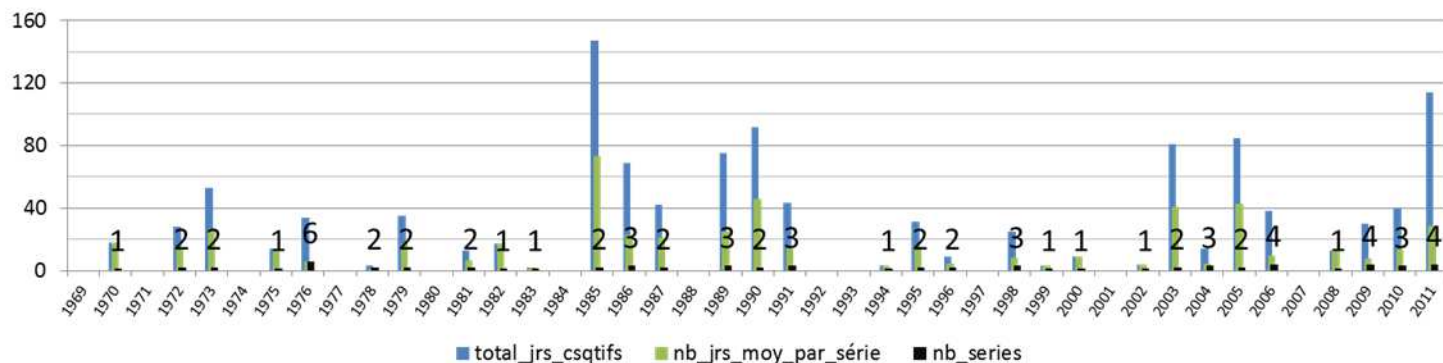


Annexe 2 Caractérisation de la sévérité de l'étiage 1969-2011

Sévérité de l'étiage: Nombre de jour de dépassement du DOE (4M3/s) à Loubejac (moyennes mobiles sur 10 jours)

	1969	1970	1971	1972	1973	1974	1975	1976	1977	1978	1979
date_debut	-	16/9	-	27/7 25/9	6/7 11/8	-	27/7	22/6 28/6 23/7 10/8 23/8 4/9	-	27/8 30/8	4/8 3/9
date_fin	-	4/10	-	12/8 7/10	19/7 20/9	-	10/8	27/6 5/7 31/7 22/8 24/8 5/9	-	28/8 1/9	12/8 30/9
nbre_jrs	-	18	-	16 12	13 40	-	14	5 7 8 12 1 1	-	1 2	8 27
	1980	1981	1982	1983	1984	1985	1986	1987	1988	1989	
date_debut	-	27/8 9/9	9/7 9/8	-	18/7 11/11	28/6 18/7 3/10	4/8 6/9	-	21/6 20/8 3/10		
date_fin	-	28/8 21/9	26/7 11/8	-	3/11 20/12	29/6 12/9 15/10	20/8 2/10	-	9/8 10/9 8/10		
nbre_jrs	-	1 12	17 2	-	108 39	1 56 12	16 26	-	49 21 5		
	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
date_debut	13/7 4/9	9/7 17/8	-	-	20/8	20/7 6/9	18/7 9/9	-	13/7 9/8 24/8	26/7 16/8	
date_fin	28/8 20/10	4/8 8/9	-	-	23/8	19/8 7/9	22/7 14/9	-	22/7 14/8 4/9	29/7 25/8	
nbre_jrs	46 46	26 22	-	-	3 30	1 4 5	-	9 5 11	3 9		
	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011
date_debut	-	22/7	21/6 17/9	3/7 13/7 22/7	23/6 2/10	12/6 4/7 22/7 3/9	-	20/9	23/7 15/8 4/9 1/10	8/7 8/8 16/9	17/6 10/8 6/9 15/11
date_fin	-	26/7	3/9 24/9	5/7 17/7 30/7	31/8 18/10	14/6 11/7 12/8 11/9	-	3/10	30/7 23/8 16/9 4/10	18/7 3/9 20/9	12/7 27/8 1/11 1/12
nbre_jrs	-	4	74 7	2 4 8	69 16	2 7 21 8	-	13	7 8 12 3	10 26 4	25 17 56 16

Sévérité de l'étiage: somme des jours consécutifs sous le DOE et moyenne par série de dépassement, à Lbjc

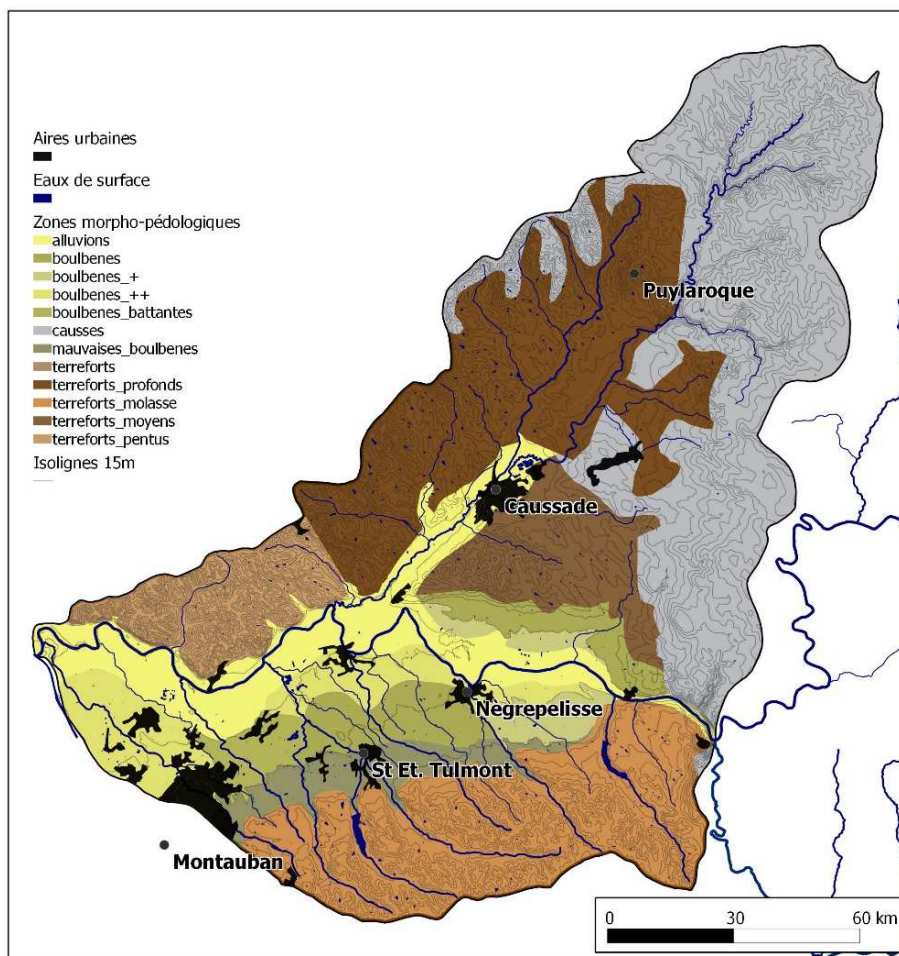


Le système agricole

Annexe 3 Caractérisation de la SAU à partir des données disponibles dans le RPG 2009

		Secteur Aveyron aval 2009		
			ares	% SAU déclarée
		sole annuelle totale	3366951	76%
Mais grain et ensilage	2	Mais grain et ensilage	584374	13%
Céréales à pailles	1	<i>Blé Tendre</i>	479951	11%
	3	<i>Orge</i>	240978	5%
	4	<i>Autres céréales</i>	258951	6%
		Céréales à pailles	979880	22%
Fourrage/PT	19	<i>Prairies temporaires</i>	723159	16%
	16	<i>Fourrage</i>	26408	1%
		Fourrage/PT	749567	17%
Gel sans production	11	Gel sans production	260114	6%
Oléo protéagineux	5	<i>Colza</i>	87330	2%
	6	<i>Tournesol</i>	457544	10%
	8	<i>Protéagineux</i>	11650	0%
	15	<i>Légumineuses à grains</i>	1067	0%
		Oléo protéagineux	619685	14%
Soja	7	Soja (Autres oléagineux)	62094	1%
Semences - Cult. Spé	10	<i>Semences</i>	128471	3%
	9	<i>Plantes à fibres</i>	205	0%
	24	<i>Autres cultures industrielles</i>	3105	0%
	25	<i>Légumes - fleurs</i>	41550	1%
		Cultures spécialisées	173331	4%
		Sole pérenne	949995	22%
Arboriculture	20	<i>Vergers</i>	182628	4%
	22	<i>Fruits à coque</i>	2722	0%
	27	<i>Arboriculture</i>	37	0%
		Arboriculture	185387	4%
Vignes	21	Vignes	38946	1%
PP/parcours	18	<i>Prairies permanentes</i>	581632	13%
	17	<i>Estives / Landes</i>	144030	3%
		PP/parcours	725662	16%
		Non classés	96833	2%
Divers	28	<i>Divers</i>	94027	2%
	13	<i>Autres gels</i>	2806	0%
		TOTAUX	4413779	

Annexe 4 Cartographie finale et paramétrage des sols pour AqYield – connaissances « hybride »

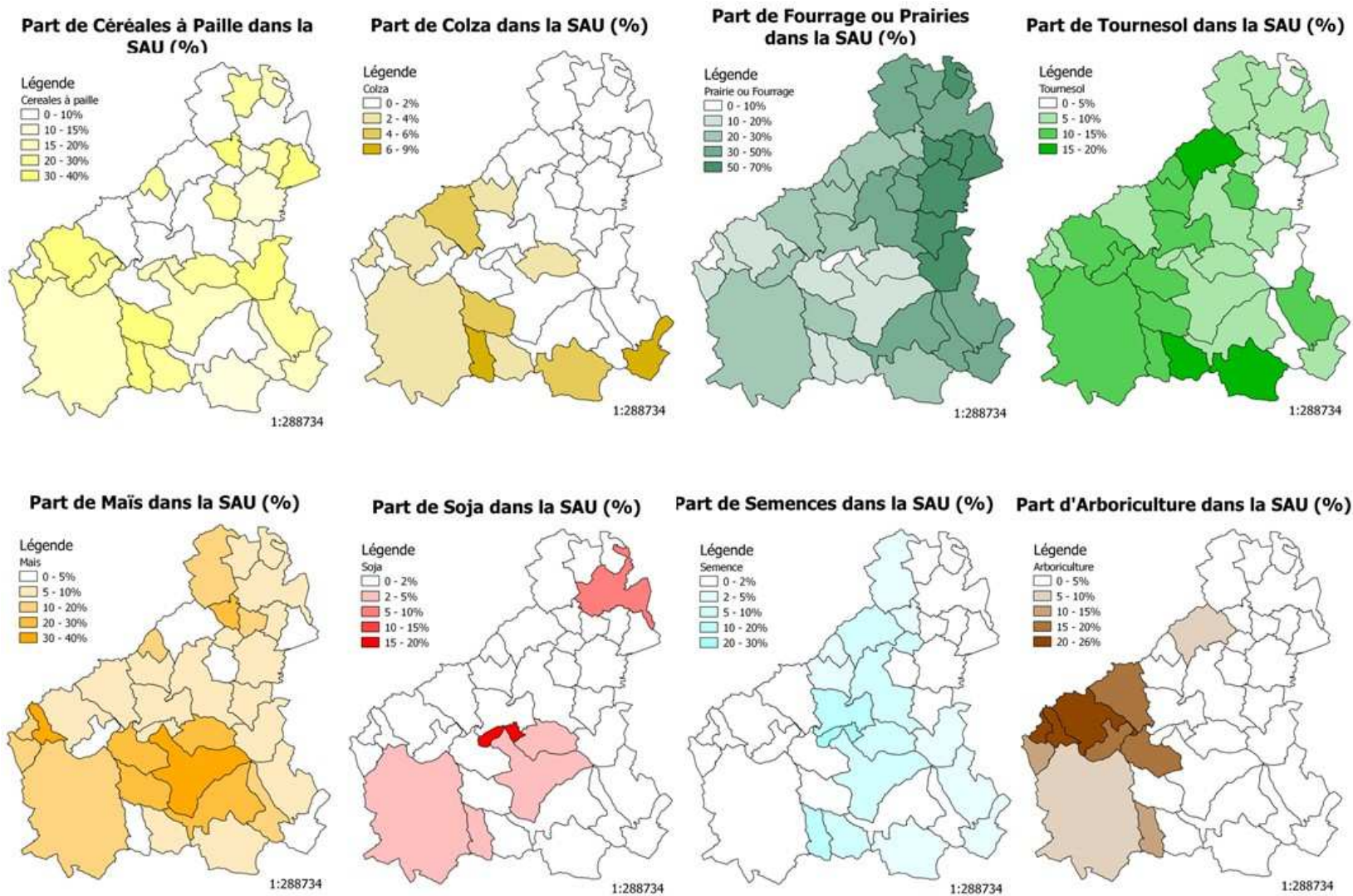


Sol	alluvions	Boulbène1	Boulbène2	Boulbène3	terrefort Moyen	terrefort Gouyre	terrefort Ouest	terrefort Est	Causses
profondeur	120	100	80	80	100	80	80	100	60
argile	15	15	15	18	35	30	35	35	40
tauxGravier	30	5	15	20	2	10	2	5	10
tauxMO	2.5	1.7	1.2	1	1.6	1.6	1.6	1.6	1.4
Cstru	1	0.95	0.8	0.7	0.9	0.9	0.9	0.9	0.9
PIRm	50	35	25	20	36	36	36	36	20
minNa	120	100	80	80	100	100	100	100	100
doslm	34	39	21	21	44	35	35	35	44
efN	0.9	0.86	0.72	0.63	0.81	0.81	0.81	0.81	0.81

Annexe 5 Paramétrage des cultures dans AqYield

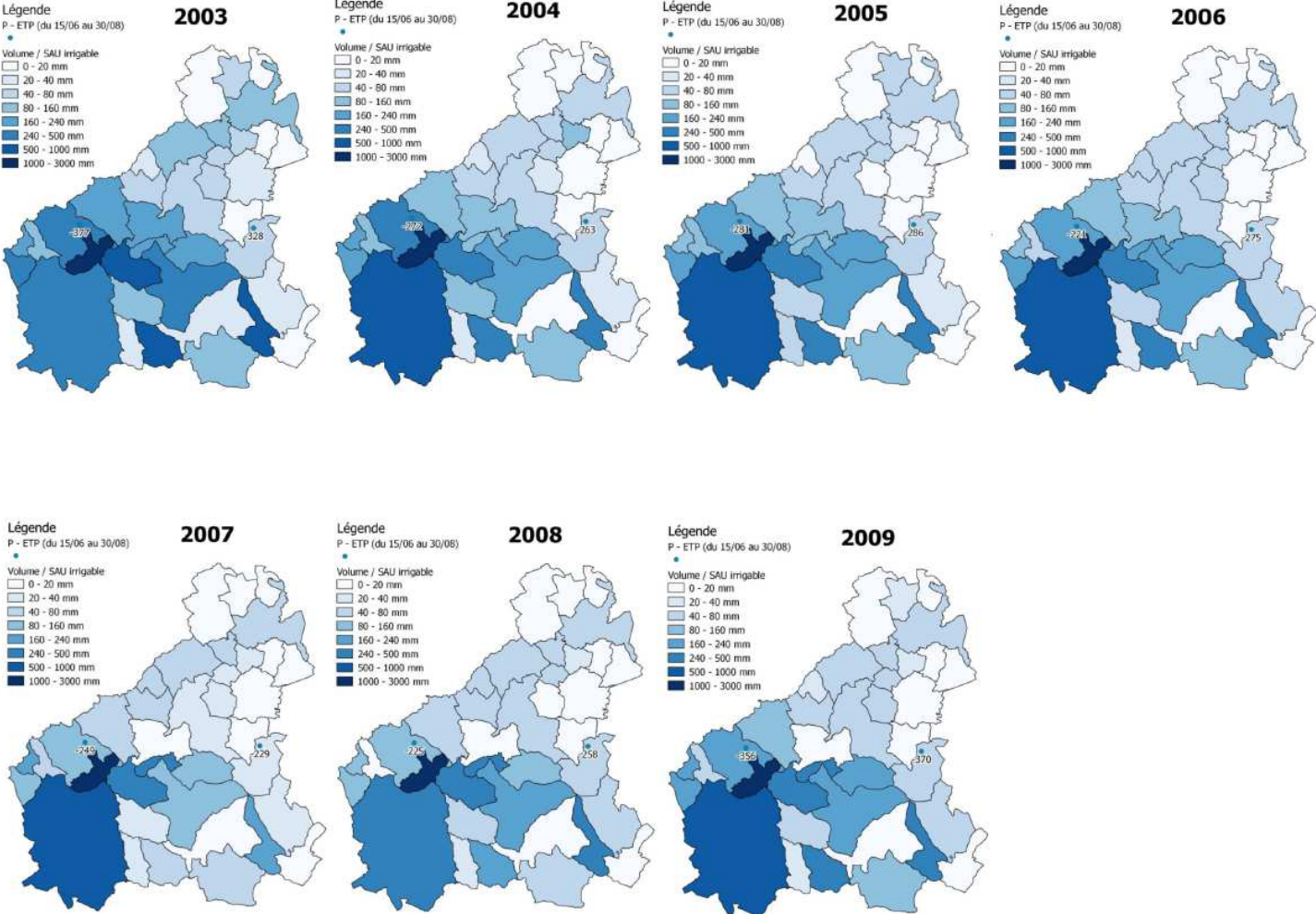
ID_ESPECE	Rdt_MOYEN	Rdt_MIN	Rdt_OPTIMA	Tbase	°C_Lev	°C_Flor	°C_matPhy	FREIN	CRACINE	CVIG	KMAX	CSTO
maisTP	110	50	120	6	80	825	1700	1	10	0.7	1.24	1
maisP	115	50	120	6	80	870	1800	1	10	0.75	1.22	1
maisDP	120	65	130	6	80	900	1850	1	10	0.8	1.2	1
maisDT	125	65	130	6	80	1000	1910	1	10	0.9	1.18	1
maisT	130	80	140	6	80	1025	1960	1	10	0.95	1.17	1
maisTT	135	80	140	6	80	1050	2040	1	10	0.98	1.16	1
maisEnsil	130	100	150	6	80	1000	1500	1	10	0.9	1.18	1
semence	110	65	120	6	80	900	1850	1	10	0.8	1.2	1
tour	25	18	35	4.8	80	1120	1720	0.3	10	1.17	1.15	2
tour_prec	25	18	35	4.8	80	1050	1630	0.3	10	1.17	1.15	2
CP	65	40	75	0	143	1300	2015	0.3	9	1	1.15	1
orge	50	40	70	0	220	2000	3100	1	10	1	1.3	2
pois	28	15	40	0	121	1100	1705	0.5	9	0.66	1.2	1
colza	32	20	40	0	132	1200	1860	0.2	9	1	1.15	1
sorgho	100	80	110	6	80	1140	1915	1	9	0.72	1.2	1
soja	21	10	40	0	209	1900	2945	1	10	0.9	1.25	1
prairiet	15	10	20	0	154	1400	2170	1	8	0.5	1.2	1
prairiep	15	10	20	0	154	1400	2170	1	8	0.4	1.2	1
vergers	60	40	80	0	220	2000	3100	1	15	0.8	1	1
prune	12	8	20	0	220	2000	3100	1	15	0.8	1	1
vignes	12	8	20	0	220	2000	3100	1	15	0.8	1	1

Annexe 6 Part des principales cultures dans la SAU des communes (RPG 2009)



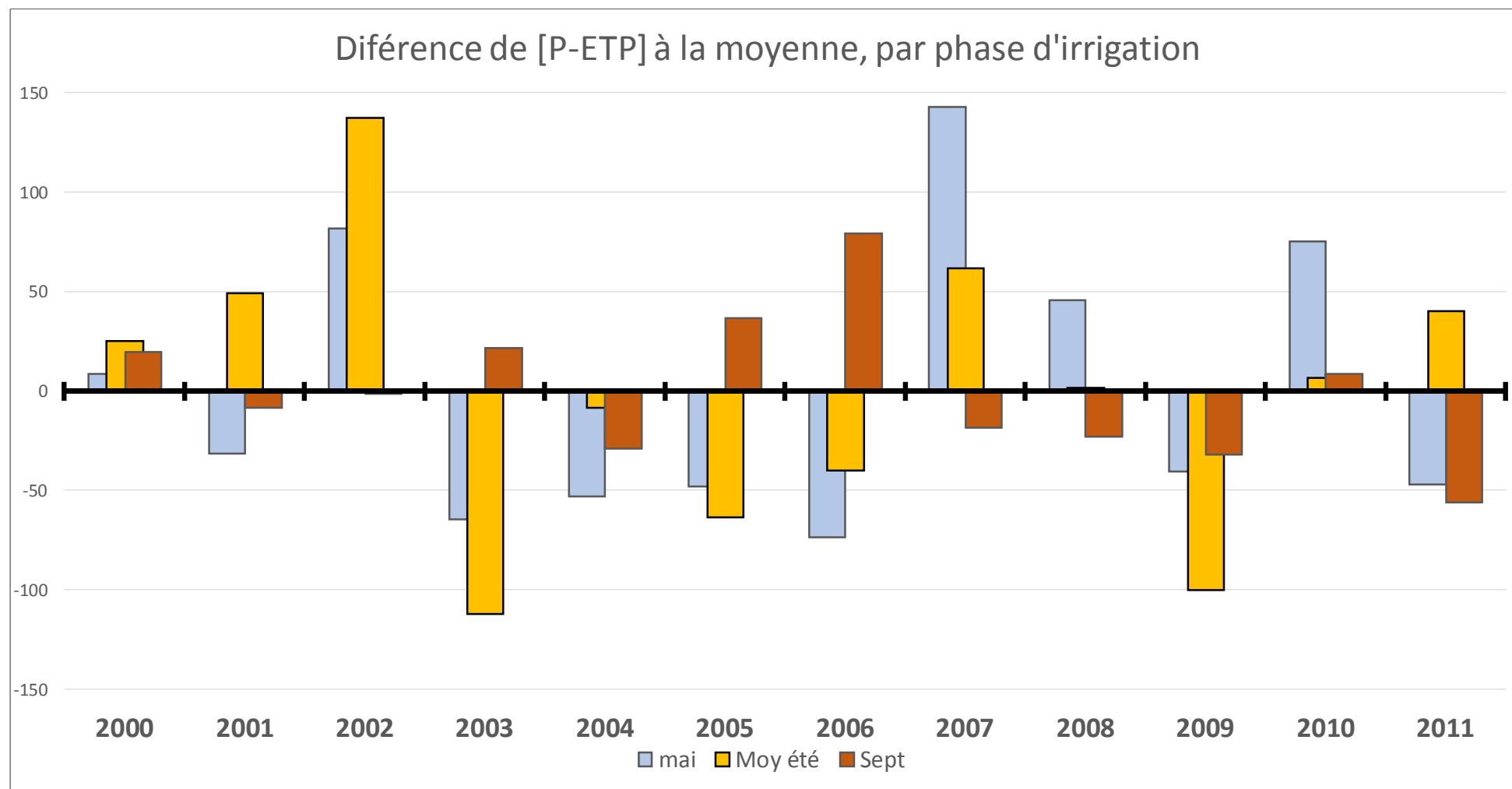
Annexe 7 Répartition par commune des volumes estimés prélevés par l'agence de l'eau

Adour-Garonne sur les communes du terrain Aveyron Aval

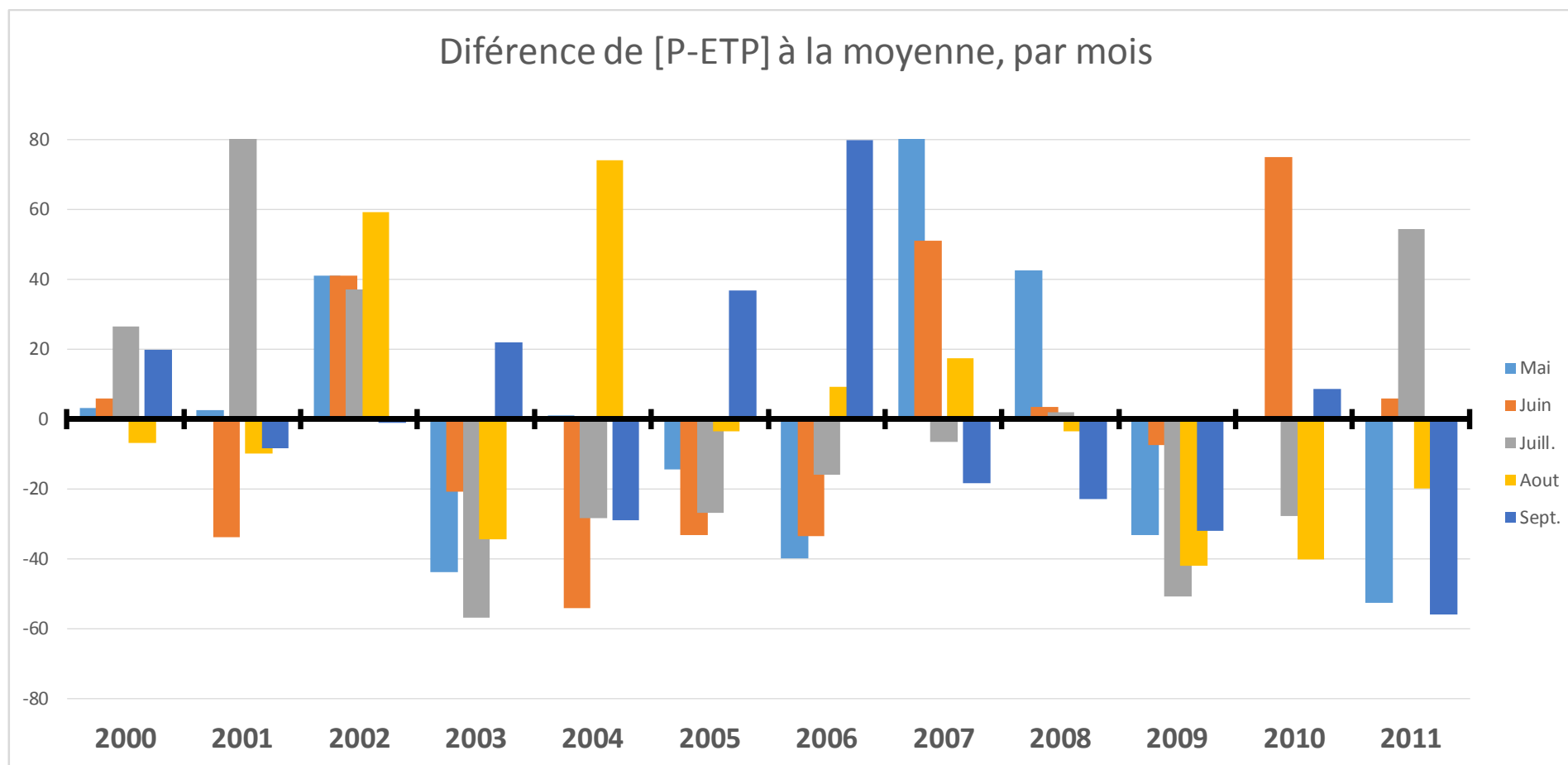


Le climat

Annexe 8 Synthèse des caractéristiques climatiques des années simulées (1/2)



Annexe 9 Synthèse des caractéristiques climatiques des années simulées (2/2)



Annexe 10 Paramétrage utilisé pour les cultures dans AqYield

(Le tableau est en deux parties pour faciliter l'affichage)

ID_ESPECE	maisTP	maisP	maisDP	maisDT	maisT	maisTT	maisEnsil	semence	tour	tour_prec	
RENDEMENT_MOYEN	110	115	120	125	130	135	130	110	25	25	
RENDEMENT_MIN	50	50	65	65	80	80	100	65	18	18	
RENDEMENT_OPTIMAL	120	120	130	130	140	140	150	120	35	35	
Tbase	6	6	6	6	6	6	6	6	4.8	4.8	
DEGRES_J_LevTbase	80	80	80	80	80	80	80	80	80	80	
DEGRES_J_Flor	825	870	900	1000	1025	1050	1000	900	1120	1050	
DEGRES_J_matPhyTbase	1700	1800	1850	1910	1960	2040	1500	1850	1720	1630	
FREIN	1	1	1	1	1	1	1	1	0.3	0.3	
CRACINE	10	10	10	10	10	10	10	10	10	10	
CVIG	0.7	0.75	0.8	0.9	0.95	0.98	0.9	0.8	1.17	1.17	
KMAX	1.24	1.22	1.2	1.18	1.17	1.16	1.18	1.2	1.15	1.15	
CSTO	1	1	1	1	1	1	1	1	2	2	

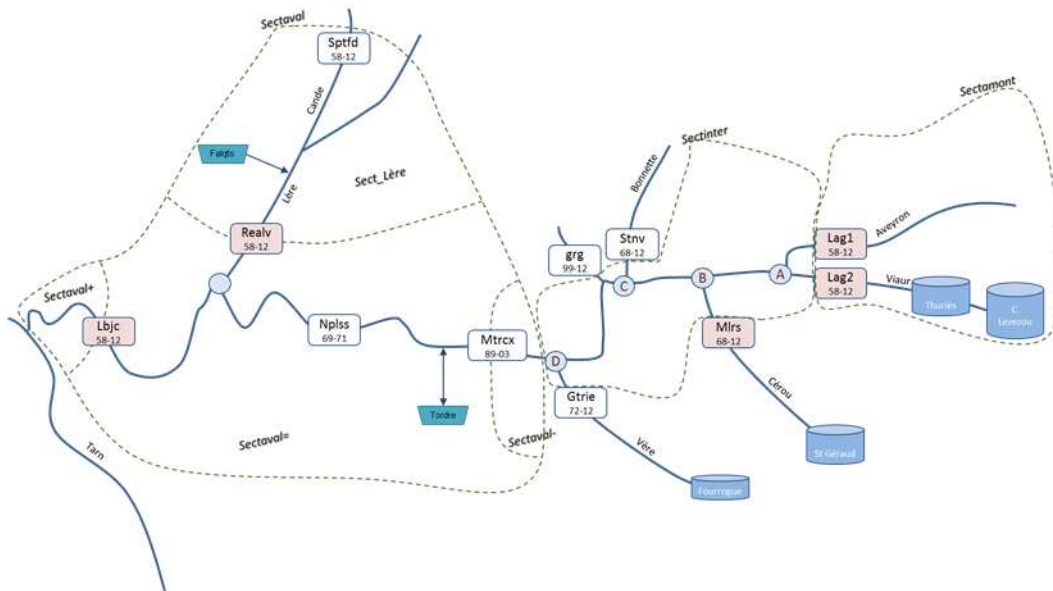
ID_ESPECE	CP	orge	pois	colza	sorgho	soja	prairiet	prairiep	vergers	prune	vignes
RENDEMENT_MOYEN	65	50	28	32	100	21	15	15	60	12	12
RENDEMENT_MIN	40	40	15	20	80	10	10	10	40	8	8
RENDEMENT_OPTIMAL	75	70	40	40	110	40	20	20	80	20	20
Tbase	0	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0
DEGRES_J_LevTbase	143	220	121	132	80	209	154	154	220	220	220
DEGRES_J_Flor	1300	2000	1100	1200	1140	1900	1400	1400	2000	2000	2000
DEGRES_J_matPhyTbase	2015	3100	1705	1860	1915	2945	2170	2170	3100	3100	3100
FREIN	0.3	1	0.5	0.2	1	1	1	1	1	1	1
CRACINE	9	10	9	9	9	10	8	8	15	15	15
CVIG	1	1	0.66	1	0.72	0.9	0.5	0.4	0.8	0.8	0.8
KMAX	1.15	1.3	1.2	1.15	1.2	1.25	1.2	1.2	1	1	1
CSTO	1	2	1	1	1	1	1	1	1	1	1

Eléments de modélisation

Annexe 11 Reconstitution du débit à l'amont

Stratégie : « par l'amont » : ajouter les débits des affluents aux débits mesurés à Laguepie :

$$Q_{\text{amont}} = \text{Lag1,2} + \text{Mlrs} + \text{Stnv} + \text{grg} + \text{Gtrie}$$



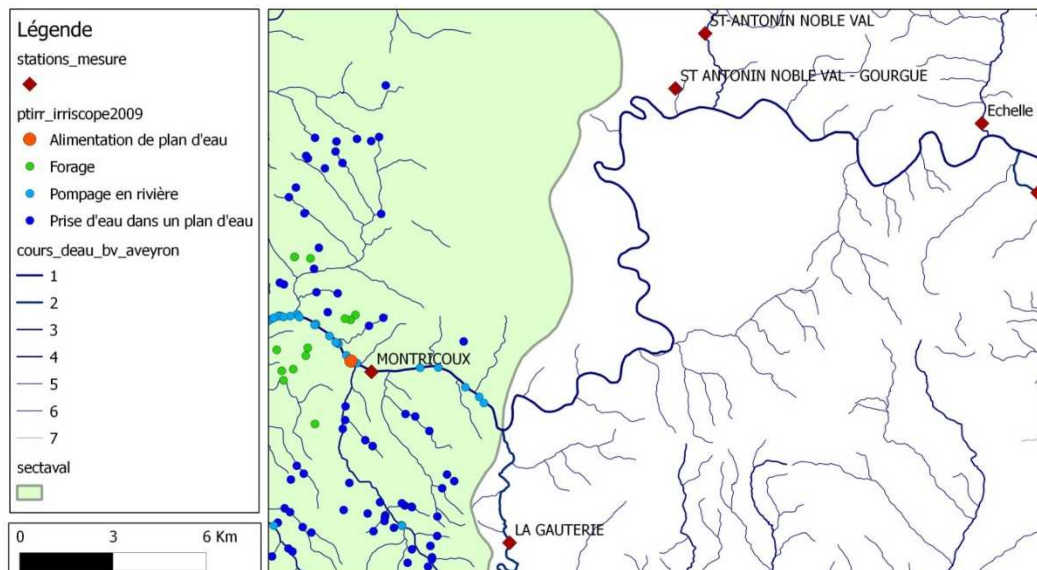
Si on compare Q_{amont} au débit à Mtrcx dans les années disponibles (90-2003), on observe une différence importante, avec Q_{amont} inférieur à celui mesuré à MTRCX :

Max : 100% le Q_{amont} est 100% de MTRCX

Min : 31% ;

Avg : 90% (Ecart-type : 0.30) , le débit reconstitué est généralement légèrement inférieur au débit à MTRCX.

Cette différence varie au cours de l'année, mais en règle générale, le débit reconstitué amont est inférieur à MTRCX mesuré. C'est logique car il y a des affluents non pris en compte par les stations de mesures :

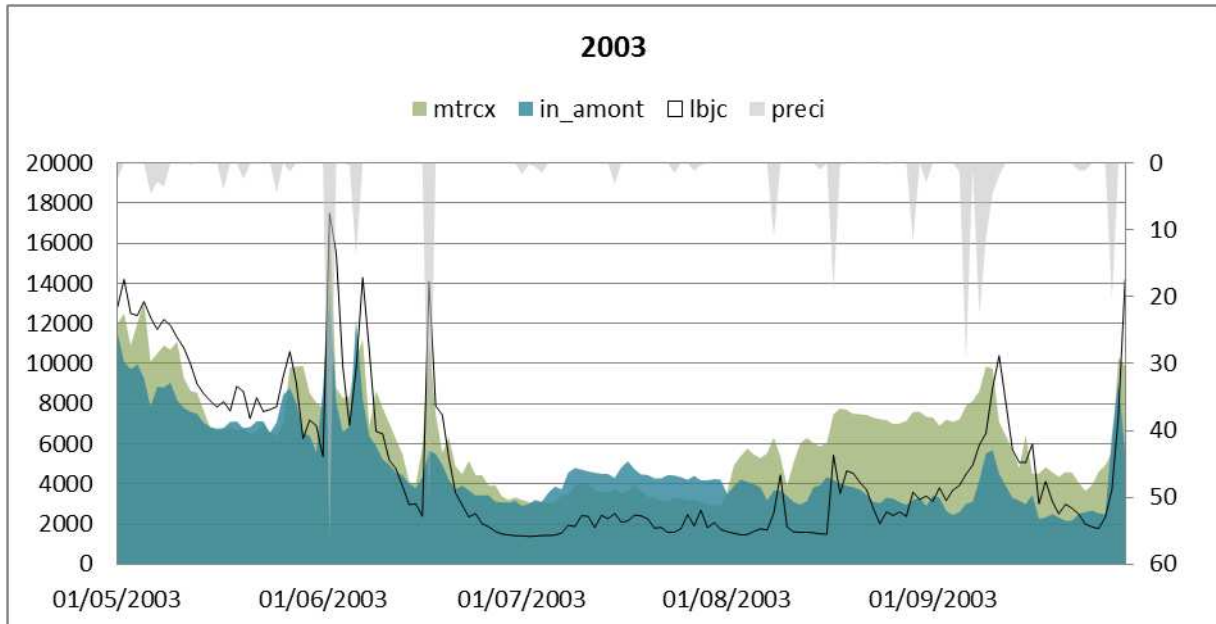


La carte ci-dessous montre les affluents juste en amont, mais il y en a beaucoup depuis Laguëpie. On observe aussi qu'il y a des points de prélèvement (4) juste en amont de la station MTRCX.

On remarque aussi qu'en général (observation Bdd sur plusieurs années) :

- MTRCX est de plus en plus supérieur à Q_amont en période de pluie
- MTRCX est inférieur à Q_amont en période d'étiage, car les prélèvements avant MTRCX impactent.

Le Graph ci-dessous montre l'exemple en 2003 (du 1^{er} mai au 30 septembre) :



Le graph montre aussi que les différences entre MTRCX et q_amont sont fort variables et difficilement compréhensibles. Nous faisons l'hypothèse que la pluviométrie impacte sur la différence entre Q_amont reconstitué et MTRCX.

Pistes

--> Pour le moment, laisser le Q_amont comme cela, considérant qu'à l'étiage il n'y a pas ou peu d'inflow et que q_amont est bien estimé (c'est faux en 2003 à partir du 1/08, cf. carte).

--> Corriger le Q_amont par un mini-modèle pluie-débit (ex. lorsque Pcumul est entre 10-30mm, on augmente Q_amont de X% pour simuler l'inflow des affluents amonts. Ceci pourrait être discuté avec la DDT pour fixer des %.

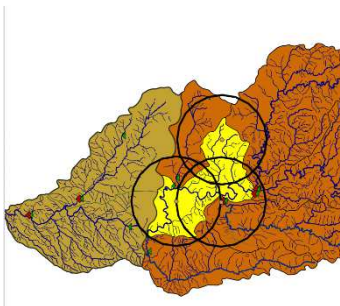
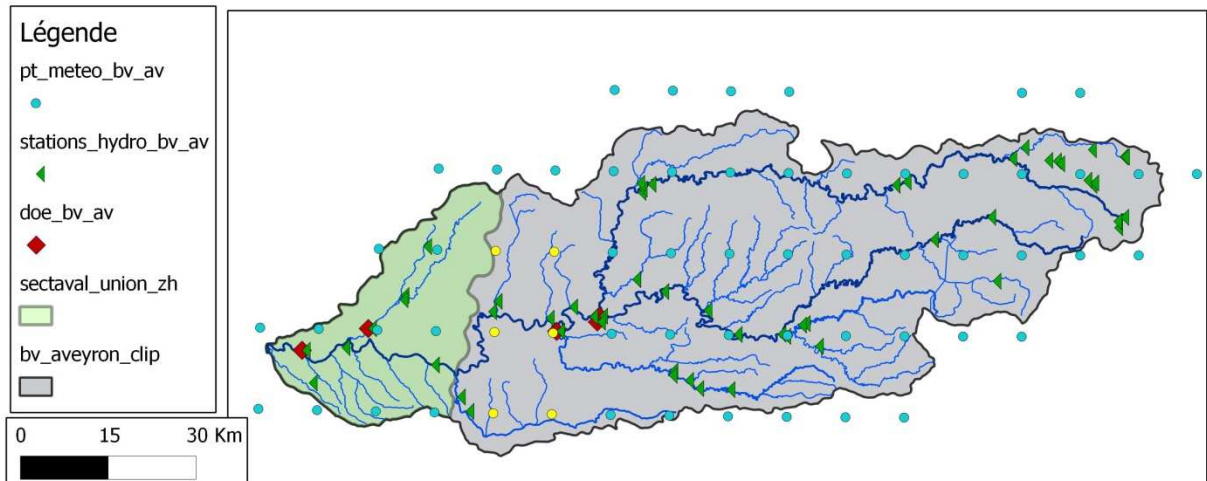
--> Attribuer un coefficient moyen par semaine de l'année, affiné en faisant des groupes d'années sèches ou années humides. Ex. en semaine 7 en année sèche, Q_amont est majoré de X%.

Etude lien pluie-débit

On cherche à étudier la relation entre le cumul de précipitation et la différence entre Q_amont et MTRCX (appelé dif_q plus loin). On pourra ainsi voir si on peut corriger Q_amont en fonction de la pluviométrie.

1. Bilan des précipitations

On prend les précipitations dans la zone des affluents de l'Aveyron non pris en compte par les stations de mesure utilisées pour évaluer q_amont (Trois points) :



Les précipitations sur ces trois points sont moyennées et pondérées en fonction de la zone qu'il concerne.

2. Tests régression

On a fait des tests de régression sur 23 ans (89-2003) pour voir s'il on peut expliquer la différence de débit entre MTRCX et Q_amont par les précipitations. Le test le plus concluant (cf annexe) relie la différence de Q pour un jour (dif_q) aux précipitations cumulées de la semaine précédente ($R^2=15\%$). Nous

3. Conclusions possibles

Il n'y a pas de relation entre les pluies et la différence de débit entre Q_amont et MTRCX car :

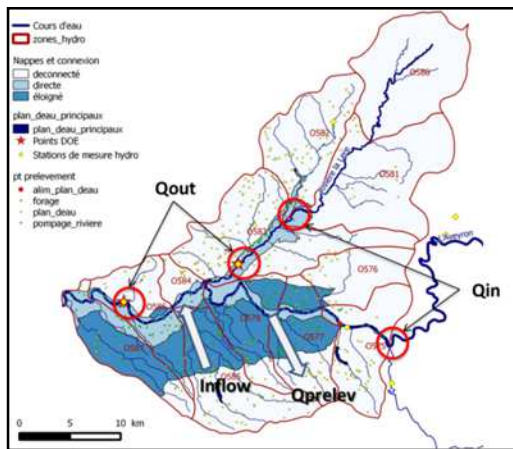
- les apports des affluents non pris en compte ne sont pas significatifs vis-à-vis du Q de l'Aveyron ;
- la relation est plus complexe que nous pouvons modéliser (effet karst, remplissage de nappe d'accompagnements etc.)
- Les données utilisées en entrées ne suivent pas un loi normale, certaines sont aberrantes

Les mesures de MTRCX sont fausses

Il faudrait utiliser des données « lissées »

Annexe 12 Calibrage de SWAT

NOTE de travail - 05/02/2014 Clément Murgue & Romain Lardy



$$Q_{out} = Q_{in} - Q_{prelev} - Inflow$$

Qout : débit en sortie

Qin : débit en entré (forcé)

Qprelev : débit prélevé par l'agricole simulé, resultant de l'interaction besoin-pratiques-restriction

Inflow : débit fournit par les ZH de la zone

EN PREALABLE :

Faire une simulation sans SWAT pour comparer $(Q_{in} - Q_{prelev})$ à Q_{out} observé (que sur l'aveyron) pour avoir une idée de ce qui manque

- On va calibrer le modèle en jouant uniquement sur les paramètres qui affectent *inflow* (SWAT) pour que Q_{out} corresponde à $Q_{observé}$
- On évalue donc la dif $Q_{out} - Q_{observé}$, avec la stratégie suivante :
 - Prendre le Log des débits afin de donner moins d'importance aux débits élevés
 - Donne du poids à la période d'étiage (15/05 -> 30/09)
 - Donne du poids au périodes ou $Q_{out} < 1.2 \times Q_{doe}$
 - Réduit le poids des périodes après les pics de précipitation (pendant 2 jours)
- Quelle série hydro-clim
 - Stratégie A : 2000-2006 pour calibration 2006-2012 pour validation
 - Stratégie B : 2006-2012 pour calibration car c'est là qu'on est le plus sûr de coller aux assolements réels et donc d'estimer les prélèvements correctement.

Question: Calibre-t-on les BV Aveyron et Lère séparément ?

- Pour : pas les mêmes géo-morpho donc il sera plus facile de trouver des jeux de paramètres qui fonctionnent
- Contre : le temps

Remarques : On considère Q_{prelev} correct et on force Q_{in} comprenant le SE => on désactive le module lachures du modèle

EN PRATIQUE : Utiliser les données déjà présentes dans l'include, mais pas celle dés-influencées (« xxx_dsfl »)

Cas calibration intégrant les deux BV :

$$Q_{in} = \text{amont} \quad \text{et} \quad Q_{out} = \text{lbjc}(O586)$$

Cas calibration séparée pour les deux BV :

$$\text{Pour Aveyron} \quad Q_{in} = \text{in_amont} (O575) \quad \text{et} \quad Q_{out} = \text{lbjc}(O586) - \text{realv}(O583)$$

$$\text{Pour Lère} \quad Q_{in} = \text{sptf}(O582) \quad \text{et} \quad Q_{out} = \text{realv}(O583)$$

Annexe 13 Lien hydraulique : Rapprocher ilots et ressources via les pts prélèvements

Présentation des données et prétraitements

Données à intégrer :

- **Retenues pour l'irrigation : *plans_deau_sectaval***

Issus de la BD Topo :

- Enlevé les cours d'eau,
- Attribué le type *grande retenues aux Falquettes*, et ajouts des noms
- Attribué un usage. Usage agricole :
 - celles les plus proches des pt_prelevements
 - ou
 - celles cités dans la BD de la ddt82
- Associer un volume estimé (2,33m³/m²).

Rmq : on ajoutera un champ *tx_remplissage_annuel* lors des simulations, calculé en fonction des cumul de précipitations hivernaux

Champs importants:

Id_surfeau : identifiant unique issu de la bd topo

Id_ptirr : null si la retenue n'est pas la plus proche d'un point de prelevement ;

Dist_ptir: distance au pt de prélèvement

Usage :

Agri

Asa : fourni le reseau asa du tordre et Gouyre

Se : peut être destocké dans les cours d'eau

- **Aquifère: *nappe_aquifere_sectaval***

- La nappe de l'aquifère des terrasses Aveyron.
- A été découpé pour séparer les aquifères qui influence la Lère ou l'Aveyron, et en zone proche et large. *Proche* : un prélèvement dans cette zone influence plus (coef. d'abattement) et plus vite (coef temps) que *large*.
- Champs :
 - Coef_abat : à remplir, diminue le débit reporté sur le cours d'eau.
 - Repart_tps : sert à répartir le débit dans le temps, de manière glissée

Ex pour repart_tps = 6 , $Q_t=0 \dots Q_{t+3}Q/6 \dots Q_{t+9}=Q/6$

- **Nappes accompagnement: *nappes_acc_directes***

- Un simple buffer de 20, 30, 50, 75 m selon la classe du cours d'eau. Un prélèvement influence directement le cours d'eau (coef. abattement = 0.9)
- Remarque : pas de pt_prelev dans ces zones pour la Lere et l'aveyron, donc pas forcément utile pour le moment.

- **Cours d'eau : *cours_deau_sectaval***
- **Pt_lachure**

Localisation des lâchers depuis les retenues de soutien d'étiage du terrain. Associe le point à un nom de retenue.

- **Pt_prelev_asa**

Localisation des points de prélèvement des réseaux asa. Associe le point à un code ASA

- **ASA : *reseaux_asa***
- La table associe le réseau à un point de prélèvement
-

Données prélèvements :

- **Pt de prélèvements : *cours_deau_sectaval***
 - La champ « *nom_type_f* » donne le type de ressource
 - --> **A faire en prétraitement : donner des identifiants uniques**
 -
- **Ilots irrigués : *ilots_irrigues2009***

Table des ilots (tous) avec l'info irrigué ou non:

Irrig_2009 : irrigué en 2009 ou non

Irrigabilité_06_09 : déclaré irrigué au moins une fois entre 2006 et 2009

Irrig_maj : ilots irrigué à utiliser : maj par la déclaration assolement (si arbo alors irrigué)

Surf_irr_reconstitué : surface irrigué de l'ilot après reconstitution (cf. Maud et Olivier)

Tx_irr : pourcentage de l'ilot irrigué après reconstitution (cf. Maud et Olivier)

Rapprochement Pt_prelev - ressource

A chaque point de prélèvement, associer une ressource

Logique proximité :

- Cours d'eau : le cours d'eau le plus proche
- ASA : le cours d'eau de prélèvement du réseau ASA
 - Rmq : pour l'asa du Gouyre, pas d'influence sur le cours d'eau (prélèvement en hiver)
- Plan_deau : le plan d'eau dont le centroïde est le plus proche
- Nappe : définir quelle nappe donc quel cours d'eau va être influencé

table visée : : Id_pt_prelev ; type_ressource ; id_ressource ; distance

Remarque : certains plans d'eau ne seront pas associer à un point après rapprochement : on pourra les supprimer de la couche

Rapprochement pt prélèvement - ilot

A chaque ilot, attribuer un pt de prélèvement pour chaque type de ressource

Démarche à mettre en œuvre, sur la sole irriguée (en rouge à laisser comme paramètre de l'algo)

1. Associer ilots aux réseaux ASA. Ilots font partis du réseau si
 - a. traversés par le réseau (tampon **50m**)
 - b. touchent un ilot qui en fait partie, et est de la même exploitation (pae_id_expl) ? (tampon **20m**)

2. Associer ilots aux autres points. Un ilot est associé
 - a. Associe les points dans les **50m (bords des ilots)** :
 - Priorité à la surface. On associe un forage que s'il n'y a pas de point de surface (forage, équidistance). Retenue peut-être en complément
 - Maximum **1 point** de chaque type
 - b. Si rien et réseau ASA, garde seulement le réseau ASA
 - c. Si rien et pas non plus de réseau ASA, cherche le point le plus proche

3. Associer les points à une ressource. Un point de prélèvement est associé à la ressource :
 - a. la plus proche,
 - b. de son type,
 - c. (Sans traverser d'obstacle route)

Annexe 14 Traitement des points de prélèvements et ilots, après lien hydraulique

01/10/2013

Connexion des points aux cours d'eau via les nappes

Objectif : assigner un lien vers la nappe en fonction de la zone de prélèvement et des coefficients d'influence en fonction de leur distance

1. Prépa

Assigner le type 'trou_deau' aux points RET qui tirent dans les retenues en « zone connectée » (assimilables à des forages), et mettre à jour le geom.

- Caractère « connecté_nappe»: le plan d'eau se situe dans une zone de prelev sur nappe (large/direct) et ne touche pas un cours d'eau de classe 3 à 5 (buffer 10m sur le cours d'eau). Nom_type_maj = 'trou_deau'
- Le geom du point devient celui du centroid de la retenue ← POUR TOUTES LES RETENUES

2. Algo

1. Attribuer un cours d'eau (**Aveyron /Lere**) en fonction du nom de la zone
2. Attribuer un lien (**direct/indirect**) en fonction du caractère lien_nappe de la zone de préleve dans laquelle il se trouve (pas vraiment nécessaire d'apparaître dans la table)
3. Attribuer des coefficients temps/abattement <- pour les points qui sont en nappe et en trou d'eau
 - a. Pour les points en lien direct : 1 jours / 0.9
 - b. Pour les points en lien indirect :

$$\text{TEMPS D'IMPACT} = [\text{DISTANCE (M)} / 1000]^{1.9} \text{ (en jours) (minimum 1)}$$

$$\text{COEF ABAT} = -0,7 \cdot \text{LOG}(\text{DISTANCE (M)} / 1000) + 0,9 \text{ (maximum 0.9)}$$

Caractère réalimenté

Objectif : identifier à quelle zone de prélèvement est lié l'ilot et s'il prélève en ressource réalimenté.

Remarques : Les ressources réalimentés sont la lère aval et L'aveyron (surface), leurs nappes d'accompagnement directes (forages et retenues dites 'trou d'eau' (cf. ci-dessous)).

3. Attribuer les zones et le caractère 'réalimenté' aux retenues et points de prélèvement

- Attribuer les infos de la table 'zone_prelev' par intersection spatiale (centroïde) :

z_prelev, sect_prelev, lien_nappe

- Classer ceux qui tirent dans les zones 'lere_av' et aveyron comme réalimenté :

realim

4. Attribuer les zones et le caractère 'réalimenté' aux ilots

- Attribuer l'info aux ilots pour chaque type de ressource (Ex. z_prel_asa = z_prelev du point ASA lié à l'ilot). Pour les points RET, attribuer une z_prel_trou si le type est trou_deau, et une z_prel_ret si le type est retenue. *z_prel_asa, z_prel_ret, z_prel_trou, z_prel_nap*
- Attribuer le caractère realim à l'ilot si **au moins un** des points qui lui est lié est réalimenté.

Caractère risque

5. Assigner un 'risque' aux retenues

- Qui ne sont pas réalimentés
- Qui sont dans les 5m d'un cours d'eau de classe 3 à 6 (bord pour les retenues), sauf retenues du Tordre et Gouyre (nom = 'Tordre' ou 'Gouyre')

6. Assigner un 'risque' aux points de prélèvement

- Qui ne sont pas associés aux *z_prelev* 'aveyron' ou 'lere_av'
- Et
 - o Type surface et forage : dans les 100m d'un cours d'eau classe 3 à 6
 - o Type *plan_deau* et *trou_deau* : dont la retenue associée est à risque

7. Assigner un 'risque' aux ilots

Assigner un *risque_ressource* si l'ilot est lié à un point à risque (*risque_sur*, *risque_ret*, *risque_tro*, *risque_nap*)

Et un risque normal (*risque= oui*) pour les ilots non réalimentés liés à un seul point à risque

et un risque fort (*risque = oui+*) pour les ilots non réalimentés liés à plusieurs point

Annexe 15 Pratiques irrigation : Priorisation ressources, gestion des restrictions

CR point 25/02/2014

Constitution des groupes d'irrigation

- Homogénéité d'ITK
- Proximité jusqu'à 10km
- Pas par ressource pour ne pas exploser le nombre de groupe

Logique de priorisation les prélèvements

Suivant le rapport de Jonas, la stratégie des agris est d'abord en ASA, puis si restriction en forage/surf/retenue :

1. ASA
2. Surface
3. Forage
4. Retenue

A chaque ressource est associé un poids qui retrace la priorité entre ressource. La valeur du poids n'a aucun sens. Chaque jours, parcours de la liste, et pioche dans la ressource qui a le plus de poids et n'est pas en restriction.

Effet des restrictions sur les groupes d'irrigation

La restriction a pour effet :

1. Le nombre de jours d'arrosage dans la semaine est réduit
2. Pour compenser, les agriculteurs mobilisent leur suréquipement et accélèrent le tour d'eau dans le groupe d'irrigation: se traduit par l'augmentation du surface irrigable par jour (SIJ)
→ Les agris irriguent moins souvent mais prélèvent plus

Dans le cas de restrictions totales (7j/7) :

- groupe homogène (toutes les parcelles sont reliées à la même ressource) : la restriction a le même effet sur tout le groupe.
- groupe hétérogène (les parcelles sont reliées à des ressources différentes, ou certaines parcelles sont reliées à plusieurs ressources): la restriction n'a pas le même effet sur tout le groupe : le tour d'eau continue pour les parcelles reliées à des ressources pas en restriction

Surf_{restri} : surface des parcelles connectées à la zone en restriction du groupe d'irrigation

nbJ_{restri}: Nombre de jour de restriction

SIJ : surface irrigable par jour (~ 1,5 ha/jr), défini par SdC dans la table RDD.

Lors d'une restriction, on regarde la Surf_{restri} à la mise en place du tour d'eau et :

Si $SIJ \cdot (6 - nbJ_{restri}) < Surf_{restri} < SIJ \cdot (7 - nbJ_{restri})$ alors on ne change pas le SIJ

Si $SIJ \cdot (6 - nbJ_{restri}) < Surf_{restri} < SIJ \cdot (7 - nbJ_{restri})$ alors $SIJ = 7/6 \cdot SIJ$

Si $SIJ \cdot (5 - nbJ_{restri}) < Surf_{restri} < SIJ \cdot (6 - nbJ_{restri})$ alors $SIJ = 7/5 \cdot SIJ$

Sinon XXXX

Annexe 16 Algorithme de création d'alternative en entrée de simulation

Exemple pour l'alternative 2 dite "Alt.Rot" dans l'article 3, seuil 40%

```
-- 1. préparation des tables
-- -- texpl: Créer une table des exploitations avec leur sau et leur surf_mais
annuelle calculée avec la surface mais déclarée en 2009
drop table if exists texpl; create temporary table texpl as select
pae_id_expl, sum(surface) sau from var.parcelles2009_mais103060_CerHiv group
by pae_id_expl;

drop table if exists texpl_surf_mais2009; create temporary table
texpl_surf_mais2009 as select pae_id_expl, sum(surface) surf_mais2009 from
var.parcelles2009_mais103060_CerHiv where cult_ref like '%mais%' group by
pae_id_expl;

drop table if exists texpl_surf_seqmais; create temporary table
texpl_surf_seqmais as select pae_id_expl, sum(surface) surf_seqmais from
var.parcelles2009_mais103060_CerHiv where sequence like '%mais%' group by
pae_id_expl;

alter table texpl add column surf_mais2009 numeric DEFAULT 0; update texpl
set surf_mais2009 = b.surf_mais2009 from texpl_surf_mais2009 b where
texpl.pae_id_expl = b.pae_id_expl; alter table texpl add column surf_seqmais
numeric DEFAULT 0; update texpl set surf_seqmais = b.surf_seqmais from
texpl_surf_seqmais b where texpl.pae_id_expl = b.pae_id_expl;

-- -- t0 : table des parcelles à traiter- les "CANDIDATS": sélectionner les
parcelles dont la rotation est de type monoculture de maïs grain
drop table if exists t0; create temporary table t0 as select a.* from
var.parcelles2009_mais103060_CerHiv a where id_sdc like '%mais*_g%';

-- -- ajouter des indicateurs aux candidats selon leur exploitation:
surf_mais2009, surf_seqmais tx_monoculture
alter table t0 add column surf_mais2009 numeric; update t0 set surf_mais2009
= b.surf_mais2009 from texpl b where t0.pae_id_expl = b.pae_id_expl;

alter table t0 add column surf_seqmais numeric; update t0 set surf_seqmais =
b.surf_seqmais from texpl b where t0.pae_id_expl = b.pae_id_expl;

-- -- parcelles_option2a_40 : une table pour stocker le parcelles traites
drop table if exists var.parcelles2009_option2a_40; create table
var.parcelles2009_option2a_40 as select * from
var.parcelles2009_mais103060_CerHiv;

delete from var.parcelles2009_option2a_40 where id_parcelle in (select
id_parcelle from t0) ;
```



```

-- 2. maj des parcelles de l'option
-- -- 2.1 exclure les parcelles non concernées :ajouter directement aux
traités et enlever de t0
-- -- parcelles des explotations non significatives ( maïs en 2009 < 1 ou
"Surf pour maïs" < 5ha) [Surf pour maïs : surface dont la sequence observé
contttient du maïs ) insert into var.parcelles2009_option2a_40 select
id_ilot, id_parcelle, caract_irr, pae_id_expl, id_sdc, sequence, index_dep,
cult_ref, surface, type_sol, paysage from t0 where surf_seqmaïs < 5 or
surf_maïs2009 < 1;
delete from t0 where surf_seqmaïs < 5 or surf_maïs2009 < 1;

-- -- 2.2 virer les parcelles au dessus dus seuil (%)
-- -- créer t1 = cumul des surf concernées par exploitation
drop table if exists t1; create emporary table t1 as SELECT id_parcelle,
surface, pae_id_expl, sum(round(100*surface/surf_maïs2009, 3)) OVER
(PARTITION BY pae_id_expl ORDER BY surface asc) as "%_cumul" FROM t0;
-- -- et enlever les parcelles au dessus de 40%
insert into var.parcelles2009_option2a_40
select id_ilot, id_parcelle, caract_irr, pae_id_expl, id_sdc, sequence,
index_dep, cult_ref, surface, type_sol, paysage from t0 where id_parcelle in
(select id_parcelle from t1 where "%_cumul">=40) ; delete from t0 where
id_parcelle in (select id_parcelle from t1 where "%_cumul">=40) ;

-- -- 2.3 Pour les parelles impactées : maj de [rotation type] et de la
[sequence]
-- -- Renommer les anciennes et ajouter les nouvelles
alter table t0 rename column id_sdc to id_sdc_old;
alter table t0 rename column sequence to sequence_old;
alter table t0 rename column cult_ref to cult_ref_old;
alter table t0 add column id_sdc character varying;
alter table t0 add column sequence character varying; alter table t0 add
column cult_ref character varying;

-- -- remplacer la rotation type
update t0 set id_sdc = regexp_replace(id_sdc_old, '.....', 'maïs/ble',
'g');

-- -- remplacer la sequence (Attention l'ordre est important à cause des
variétés )
update t0 set sequence = 'maïsP_CP' where sequence_old like '%maïsP_%' or
sequence_old like '%maïsP';
update t0 set sequence = 'maïsT_CP' where sequence_old like '%maïsT_%' or
sequence_old like '%maïsT';

```

```

update t0 set sequence = 'maisTT_CP' where sequence_old like '%maisTT%';
update t0 set sequence = 'maisTP_CP' where sequence_old like '%maisTP%';
update t0 set sequence = 'maisDT_CP' where sequence_old like '%maisDT%';
update t0 set sequence = 'maisDP_CP' where sequence_old like '%maisDP%';

-- -- 2.4 Pour les parcelles impactées : maj de la cult_ref et INDEX_DEP en
répartissant au mieux entre maïs et CP au sein des exploit !!et sur le
territoire !!

-- -- t2: calcul de la part de la parcelle dans la surface de l'exploitation
qui change pour rotation

drop table if exists t2; create temporary table t2 as select id_parcelle,
surface, pae_id_expl,surface/(sum(surface) OVER (PARTITION BY pae_id_expl))
as "%_changed" from t0;

-- -- t3 cumul pour traiter la moitié automatiquement:

drop table if exists t3; create temporary table t3 as select *,
sum("%_changed") OVER ( PARTITION BY pae_id_expl ORDER BY surface asc)
"%_changed_cumul" from t2; delete from t3 where "%_changed_cumul" > 0.7;

-- -- puis maj de la culture de ref pour le reste

update t0 set cult_ref = 'maisP' where cult_ref_old like '%maisP%' or
cult_ref_old like '%maisP';

update t0 set cult_ref = 'maisT' where cult_ref_old like '%maisT%' or
cult_ref_old like '%maisT';

update t0 set cult_ref = 'maisTT' where cult_ref_old like '%maisTT%';
update t0 set cult_ref = 'maisTP' where cult_ref_old like '%maisTP%';
update t0 set cult_ref = 'maisDT' where cult_ref_old like '%maisDT%';
update t0 set cult_ref = 'maisDP' where cult_ref_old like '%maisDP%';

update t0 set cult_ref = 'CP' where id_parcelle in (select id_parcelle from
t3) or cult_ref_old not like '%mais%';

update t0 set index_dep = '1' where cult_ref = 'maisP';
update t0 set index_dep = '1' where cult_ref = 'maisT';
update t0 set index_dep = '1' where cult_ref = 'maisTT';
update t0 set index_dep = '1' where cult_ref = 'maisTP';
update t0 set index_dep = '1' where cult_ref = 'maisDT';
update t0 set index_dep = '1' where cult_ref = 'maisDP';

update t0 set index_dep = '2' where id_parcelle in (select id_parcelle from
t3) or cult_ref_old not like '%mais%';

-- 2.4 insérer dans la table des parcelles traitées

```

```

insert into var.parcelles2009_option2a_40 select id_ilot, id_parcelle,
caract_irr, pae_id_expl, id_sdc, sequence, index_dep, cult_ref, surface,
type_sol, paysage from t0;

-- clean: enlever les doublons

create index idx_parcelles2009_option2a_40 on var.parcelles2009_option2a_40
(id_parcelle) ; ALTER TABLE var.parcelles2009_option2a_40 ADD column pkey
serial; ALTER TABLE var. parcelles2009_option2a_40 ADD PRIMARY KEY (pkey) ;
delete FROM var.parcelles2009_option2a_40 t1 WHERE EXISTS (SELECT * FROM var.
parcelles2009_option2a_40 AS t2 WHERE t1.pkey < t2.pkey and t1.id_parcelle =
t2.id_parcelle) ; ALTER TABLE var.parcelles2009_option2a_40 drop column pkey;

-- liste des exploit impactés

select b.* from var.expl_option2a_40 a, texpl b where
a.pae_id_expl=b.pae_id_expl order by surf_mais2009 desc;

```

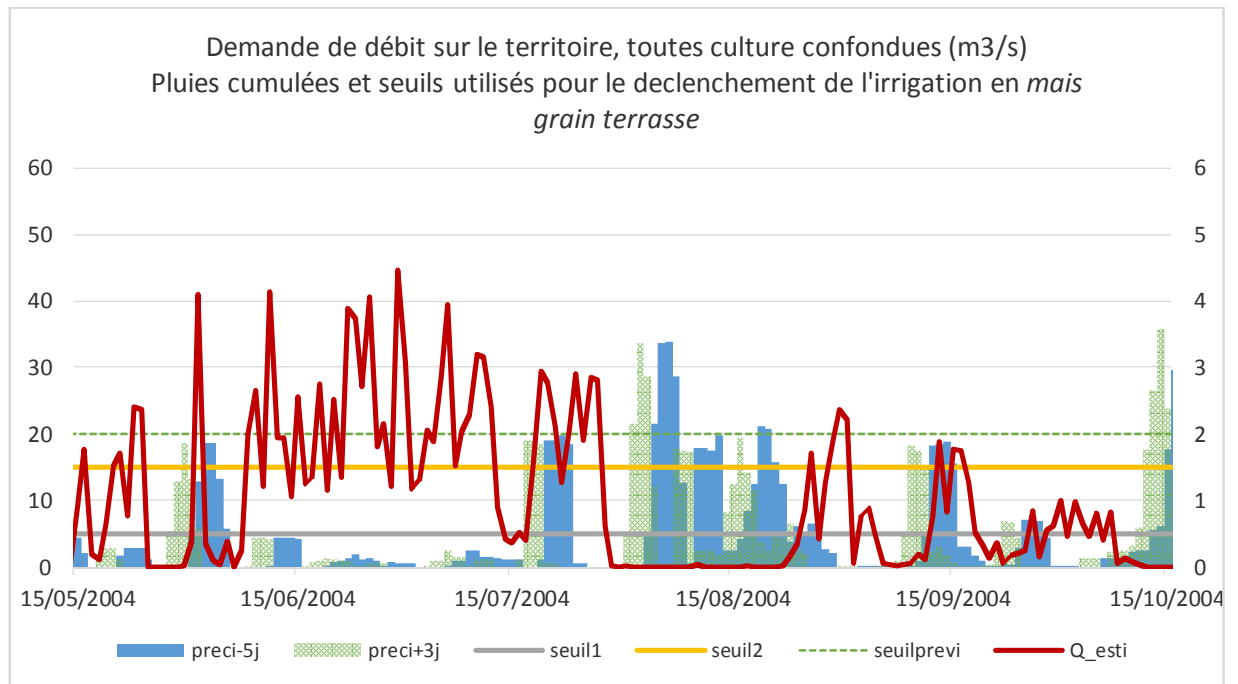
Validation des sorties de simulation

Annexe 18 Dynamiques de prélèvement

30/04/2014- Importance des groupes irrigation

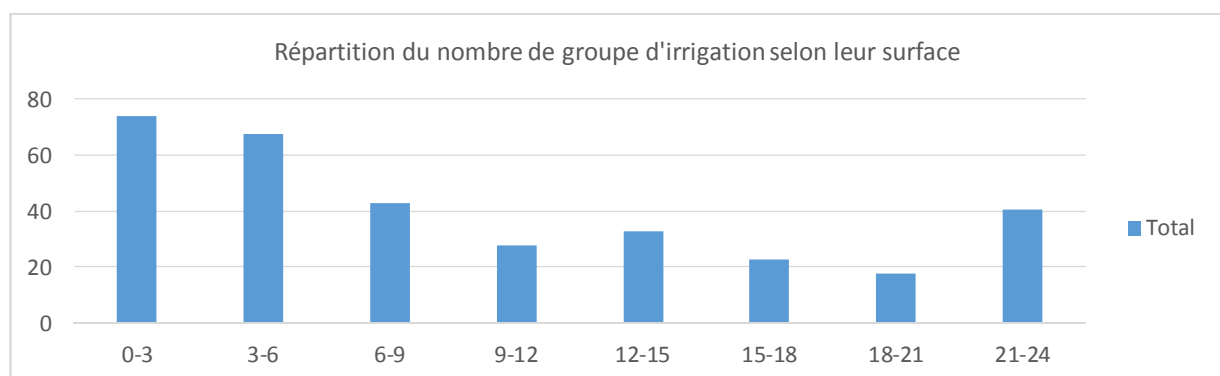
Présentation du problème

Les « pics » de prélèvements observés sont dus à la concentration de la demande en eau les premiers jours des tours d'eau lorsque la surface du groupe d'irrigation est inférieure à la surface max :



Nous avons essayé de régler le problème en « décalant » les dates de semis mais ça ne suffit pas.

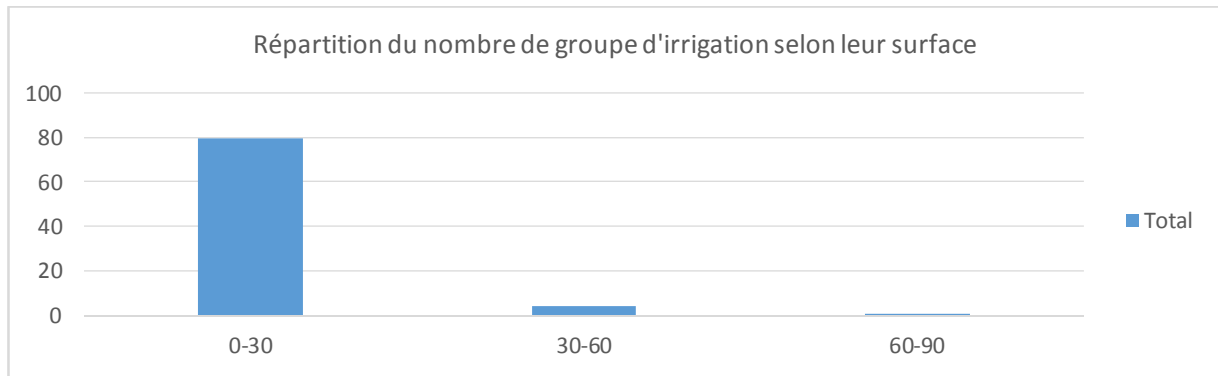
- **Ex. du maïs grain (Surface max = 21 = 3 Ha/j x 7 jours)**



Les groupes d'irrigation faisant de 0 à ha sont tous irrigués les premiers jours du TD

Il n'y a que les groupes de 18 à 24 ha où les prélèvements sont continus sur tout le TD

-
- **Problème avec les vergers :**



Le problème est accentué avec les vergers où on a mis une vitesse d'irrigation très élevée pour simuler le goutte à goutte -> surface max du groupe d'eau très élevé ($30\text{ha/j} * 7\text{j} = 210\text{ ha}$). L'effet escompté est l'inverse de ce que l'on comptait faire : les prélèvements se concentrent sur une journée.

Proposition de solution

- Pour les vergers : revoir impérativement la vitesse d'irrigation en accord avec le nombre de jours des tours d'eau
-
- Faire varier les paramètres Ha/j en fonction de la taille de l'exploit
-
- Distinguer une variable « équipement » déterminant la taille max des groupes d'irrigation (le 3 Ha/j actuel) et une variable vitesse réelle modulé par l'état de complétude du groupe d'irrigation (ex. j'avance 2x moins vite si le groupe d'irrig est complet qu' 50%)
-
- Répartir la décision de commencer une irrigation selon les exploitations : seuil de déclenchement n'est pas 15 mm => certainement pas suffisant car les cumul de pluie ne sont pas fins.
-
- Forcer l'agriculteur à répartir ses jours d'irrigation lorsqu'il a plusieurs groupes d'irrigation « non complet » (càd où $\text{surfaceGroupe} < \text{surfaceMax}$). Par exemple s'il a deux groupes irrigation de 6 ha à couvrir en 7 jours, il fait le premier les deux premiers jours et le deuxième les deux suivants.
-
- Constituer de groupes d'irrigation plus « complets » (càd où surfaceGroupe se rapproche de surfaceMax). Par exemple en regroupant au sein d'un même groupe des ITK différents mais ayant le même TD.

Problème : il y a beaucoup d'exploit avec 1 seul groupe d'irrigation, donc même en rassemblant certains itk ça ne changera rien pour 30% des groupes...

Annexe 19 Décalage entre AEAG et simulé

le 03-09-2014

On sous-estime les V annuels par rapport à l'AEAG. **je confirme mes chiffres** : l'AEAG estime en général au-dessus de MAELIA, sauf pour les dernières années:

	AEAG	Sit. Actuelle dif	
2001		12.4	
2002		7.6	
2003	22.7	19.4	-15%
2004	17.7	14.0	-21%
2005	15.8	14.3	-10%
2006	17.6	16.0	-9%
2007	11.3	11.2	-1%
2008	12.8	11.4	-11%
2009	17.3	18.2	5%
2010	14.2	15.4	8%

D'autres pistes explicatives:

- Nous appliquons bien un coefficient de 15% de perte. Romain doit vérifier qu'il est effectivement comptabilisé dans les bilan annuels. Réponse rapidement. Par contre si cela résout le problème jusqu'à 2008, il l'inverse après. Dans tous les cas je proposerai de considérer plutôt 10%
- Maud m'a aiguillé sur l'importance des erreurs d'estimation AEAG. D'après ses interactions avec S. Bareyre (cf. ses rapports), la vraie cassure pour les données AEAG se situe en 2008 avec l'application de la LEMA et les compteurs (déductions des AntiGel, des doubles comptes pour le remplissage des retenu, et meilleure spatialisation). Hors justement nos simus collent *plutôt* mieux depuis 2008. Je ne suis pas si sûr qu'il faille considérer que l'AEAG sous estime systématiquement sur tous les BV du BAG. Je propose une ébauche de document intéressant en construction (PJ).
- Nous nous basons sur un RPG 2006-2009: normal qu'on soit meilleurs sur ces années et 2010

Comme solution:

- Du coup il apparait assez crucial de récupérer les données aeag 2011 pour comparer avec nos simus (on a ce climat) et voir si la tendance "perfection" de 2009 2010 continue. Je vais évaluer le travail que ça représente.
- Considérer que l'AEAG se goure pas mal.... en tout cas jusqu'à 2008 et de toute façon dans les mêmes mesures que nous.
- On pourrait gonfler les pratiques simulées (voir graph dessous), notamment les semences, maïs (TT T DT) et les vergers, mais dans ce cas les valeurs dans la table des RDD ne seraient plus cohérentes (ex. 50mm par tour d'eau). Je vais faire un test en augmentant les doses sur les premières irrigations de l'année (20mm pour le moment).

CR d'ateliers participatifs

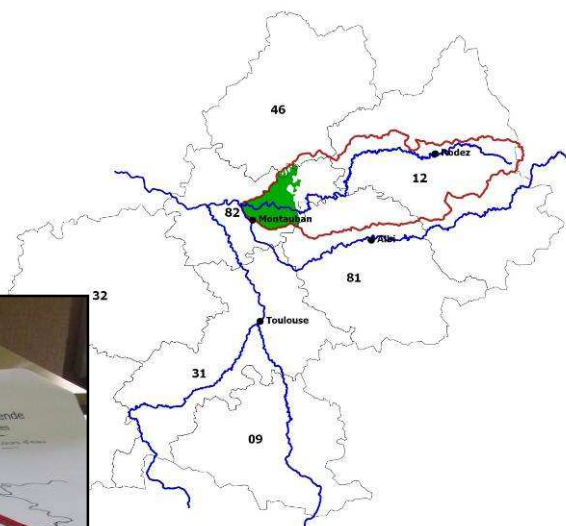
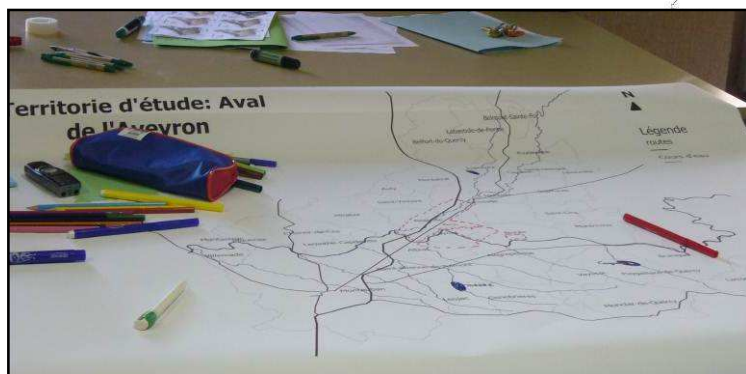
Compte Rendu Zonage à Dire d'Acteur

Caractériser le territoire irrigué à l'aval de l'Aveyron



Réalville, le 12 juin 2012

Clément Murgue



Je tiens à remercier les participants du ZADA, ainsi que la mairie de Réalville.

1 Introduction : pourquoi un ZADA ?

Le ZADA, ou zonage à dire d'acteur, s'est déroulé dans le cadre d'une **démarche de recherche participative**, c'est-à-dire où les acteurs du terrain prennent part au processus de recherche.

Le projet de recherche en question porte sur la **modélisation et l'évaluation du territoire irrigué en vue de la gestion quantitative de l'eau**. La caractérisation du territoire constitue la première étape du processus. Elle vise à représenter au mieux la réalité territoire dans ses aspects relatifs aux systèmes de culture et à la gestion quantitative de l'eau. C'est une étape nécessaire pour, par la suite, construire des alternatives de systèmes de culture et les évaluer. Pour cette caractérisation du territoire, l'équipe de recherche a choisi de **croiser les données des statistiques agricoles (RPG) avec la vision qu'ont les acteurs agricoles de leur territoire**. Un enjeu de l'atelier était donc de voir si les conclusions issues de l'exploration des données peuvent compléter ou être complétées par les données issues de l'atelier ZADA.

A titre d'exemple, le RPG a permis d'identifier les îlots où est pratiquée la monoculture de maïs. Cependant cette information est peu précise comparée à l'expertise de terrain : les acteurs ont en effet su différencier deux types de système de monoculture maïs, et précisé leurs critères de répartition dans le territoire, spatiaux et non spatiaux.

A court terme, les résultats du ZADA ont été utiles pour construire un échantillon d'exploitations agricoles à enquêter (stage de Jonas Hipolito). Les systèmes de culture représentatifs du territoire seront alors détaillés et renseigneront en détail le modèle de représentation du territoire.

Dans le long terme, le ZADA est le point de départ du processus de recherche participative. Les personnes ayant participé à l'atelier seront remobilisées dans les étapes suivantes (validation et calibrage du modèle de territoire, élaboration d'un outil d'évaluation des performances du territoire irrigué dans les aspects de gestion quantitative de l'eau et de durabilité, conception d'alternatives de distribution des systèmes de culture dans le territoire).

Objectifs de la journée

Cet atelier de travail avait pour objectifs principaux de :

- ➔ Produire une liste de systèmes de culture représentatifs du territoire
Quels sont les SdC principaux?
- ➔ Discuter de leurs critères d'existence et de répartition dans le territoire
Où sont-ils? Pourquoi sont-ils là ?

La démarche envisagée était de

- a) Lister les rotations

Quelles sont les rotations principales du territoire? *ex: Mais*, Blé-Tournesol*

- b) Lister les SdC associées aux rotations

Quelles pratiques peuvent différencier une même rotation? *ex: Mais* 8 tours d'eau; Mais* 4 tours*

- c) Pour chaque système:

- Le Localiser

Où se trouve le SdC? *ex. le 'M* 8 tours d'eau' se trouve à Negrepelisse*

- Identifier les critères d'existence et de répartition

Pourquoi ? *ex. Le M* dans les îlots assez grands pour accueillir un Pivot*

Pour des exploitants proches de la retraite

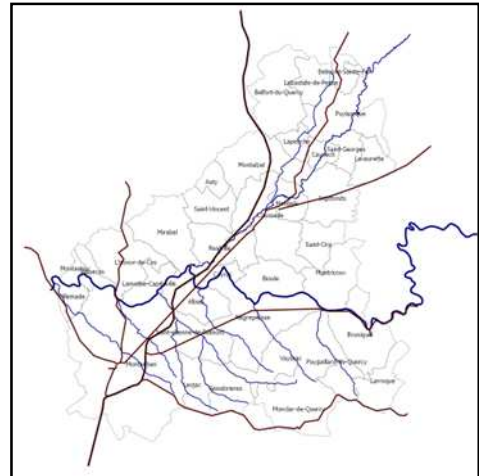
2 Matériel et méthodes

L'atelier de travail tel qu'il a été conçu a fait appel aux méthodes de zonage à dire d'acteur (ZADA), complétées par des discussions autour des critères de répartition des systèmes de culture (SdC) spatiaux et non spatiaux.

Nous avons préféré un **travail collectif** plutôt qu'une répétition d'enquêtes personnelles car nous considérons que l'échange entre parties prenantes favorise l'émergence de connaissances implicites tacites, les acteurs étant forcés de formaliser leur point de vue pour être bien compris.

Figure 1 : fond de carte utilisé pour le ZADA

L'équipe organisatrice avait préparé un matériel issu de l'exploration des bases de données RPG 2006-2009 ; SiEau¹ ; et cartes pédologiques de la CRAMP. Ce matériel devait servir au facilitateur pour mettre en question les dires des participants et lancer des sujets s'ils n'ont pas été abordés, il est disponible en annexe.



La démarche générale envisagée était la suivante :

1. Lister les rotations principales, et y associer un SdC type en fonction des pratiques,
2. Localiser les SdC dans le territoire (ZADA)
3. Lister les critères d'existence de chaque SdC

En pratique, l'atelier ne s'est pas déroulé de cette manière car les participants ont préféré lister les critères déterminants l'existence et la répartition des SdC avant de réfléchir à une liste de SdC représentatifs de la zone.

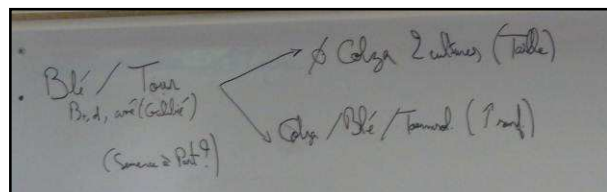


Figure 2 : photos illustrant l'échange entre le groupe de travail et le facilitateur.

3 Déroulement de la journée

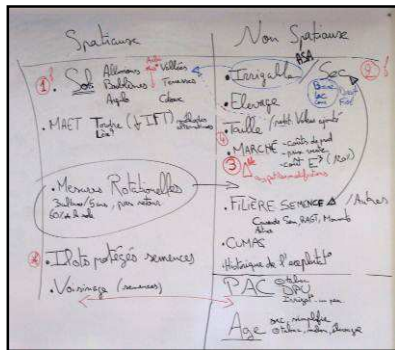
1. Lister les critères spatiaux et non spatiaux qui déterminent l'existence d'un SdC dans le territoire

La démarche prévue avait envisagé de commencer par lister les rotations principales du territoire. Les participants ont cependant voulu travailler à associer des pratiques à la première rotation listée (B/T, cf. fig.), c'est à dire à s'interroger sur les SdC. Leurs interrogations les ont rapidement menés à s'interroger sur les critères déterminants des SdC liés au type d'exploitation.



¹ Le Système d'information de l'Agence de l'eau Adour Garonne (Volume prélevés estimés notamment)

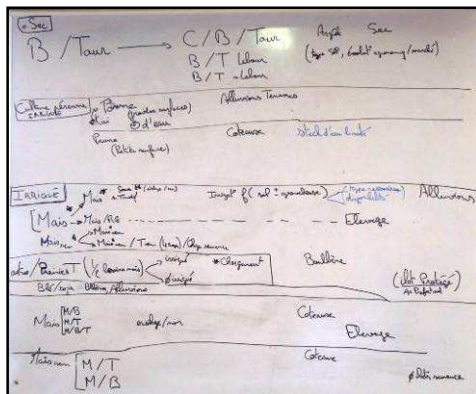
Figure 3 : premier essai de listing des rotations et SdC principaux du territoire



Le groupe a donc choisi de lister des critères afin de pouvoir s’y les utiliser pour lister les SdC par la suite. Il en est sorti une liste de critères, catégorisés et hiérarchisé comme tels :

Figure 4 : photo du tableau final imageant la discussion sur les critères d’existence des SdC.

2. Lister les SdC existants et y associer des critères d’existence.



Ceci était le cœur de la discussion de la rencontre car il a fallu prendre des décisions sur la simplification du territoire (*‘Il y a de tout, partout’*).

Pour chaque rotation, les acteurs ont identifié des critères d’existence significatifs et quelle forme ils prenaient.

La discussion était appuyée par les tables reprenant les principales rotations identifiées par le travail de séquençage du RPG de 2006 à 2009 (cf. annexe XX)

Figure 5 : photo du tableau final imageant la discussion sur les SdC du territoire

3. Caractérisation spatiale du territoire

a) Se mettre d’accord sur la distribution du critère spatial principal : le contexte pédo-morphologique.

La carte des sols et de relief (cf. annexe) a servi de support à l’identification de zones pédo-morphologiques uniformes et de gradients intrinsèques aux zones.

b) Délimiter des zones d’homogénéité pour l’occurrence des SdC

Pour chaque zone délimitée, les acteurs ont précisé les systèmes de culture principaux qui s’y trouvent. Ils ont précisé les critères non spatiaux qui peuvent déterminer l’existence d’un SdC plutôt que l’autre (ex. *P* irrigué si l’exploitation est en polyculture élevage avec un fort chargement*).

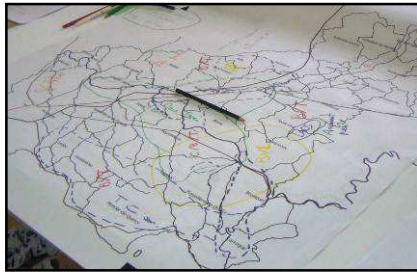


Figure 6 : photo du poster support du zonage à dire d'acteur

Remarque:

L'atelier n'a pas suivi la démarche qui avait été prévue. Les acteurs ont en effet rapidement mis l'accent sur la nécessité de lister et de détailler la variabilité des critères d'existence des SdC pour pouvoir les manipuler et créer une liste. C'est en fait la démarche inverse de ce qui avait été imaginé.

4 Résultats de l'atelier

Les résultats de cette journée de travail correspondent aux objectifs fixés. Nous avons pu établir :

- Une liste des critères significatifs déterminant la répartition des SdC dans l'espace et les systèmes de production.
- Une liste de système de culture 'types' du territoire, croisant rotation et pratiques associées
- Une vision spatiale de la répartition des SdC dans le territoire
- Pour chaque SdC, les critères de répartition

Les sections suivantes reprennent les résultats des discussions sous formes brute mais mise en page.

Liste des critères d'existence des systèmes de culture

Le tableau ci-dessous présente les critères tels qu'exprimés par les participants lors du ZADA, ainsi que leur classement d'importance :

Spatiaux	Non Spatiaux
<ul style="list-style-type: none"> • Sols <ul style="list-style-type: none"> Alluvions - Vallées Boulbènes - Terrasses Argilo Calc - Côteaux • MAET (Tordre/Lère?) IFT bas et méthodes alternatives • Ilot protégé semence 	<ul style="list-style-type: none"> • Irrigable / Sec <ul style="list-style-type: none"> Borne ASA Lac Cours d'eau • Elevage • Taille <ul style="list-style-type: none"> Age de l'exploitant • Voisinage Semence <ul style="list-style-type: none"> Arrangements entre voisins • Mesures rotationnelles

	<p>3 cultures/5 ans, pas de retour, sur 60% de la sole</p> <ul style="list-style-type: none"> • Marché Responsable de 20 % max des modifications d'assolement à court terme • Présence ou contact Filière Semence / ou autre • CUMA • Historique d'exploitation • PAC, DPU
--	--

Tableau 1 : tableau des critères influençant la mise en œuvre des SdC dans le territoire, tels qu'exprimés lors du ZADA.

Critères principaux retenus pour expliquer l'existence d'un système de culture

Une réflexion sur la liste établie lors du ZADA a permis de dégager une liste formalisée des critères principaux déterminant la présence d'un SdC. Nous avons notamment identifié des critères spatiaux et d'autres relevant des systèmes de production dans lesquels ils sont mis en œuvre.

Des critères de distribution d'ordre spatiaux, c'est-à-dire dont la variabilité est liée à leur position dans l'espace :

1. Le contexte pédo-morphologique.

Les zones de coteaux sont contraignantes, la spécialisation en monoculture de maïs y est difficile du aux difficultés de travail du sol après la récolte. Comme le tableau ci-dessus l'indique, ce critère oriente les possibles SdC mis en œuvre suivant trois contextes : alluvions et bonnes bouldières en plaines (premières terrasses) ; bouldières froides et battantes en plaines et faibles pentes (terrasses éloignées), argilo calcaires en pentes (coteaux).

Ce critère varie à l'échelle du territoire, de manière continue, et peu à l'échelle des exploitations ou des parcelles. Les participants ont cependant cité une variation dans le contexte de coteaux avec des sols plus légers en hauts de pentes.

2. 'L'irrigabilité'.

C'est aussi un facteur primordial, notamment pour l'obtention de contrat de semence ou de maïs qualité (ex. pop corn).

- Présence d'une borne ASA / d'un pompage en rivière, en lac collinaire / d'un forage
- Taille de la parcelle (les grandes parcelles valent un investissement en irrigation)
- L'équipement (l'investissement dans un pivot va motiver l'irrigation systématique et la mise en place de la monoculture de maïs.

3. Le contexte semencier

Ce critère peut se décliner en plusieurs points, liés au contexte pédo-morphologique, l'irrigabilité des parcelles, et le type et la trajectoire de l'exploitation.

- L'accès aux contrats de semence, c'est-à-dire la confiance des semencier en l'exploitant (histoire, accès à l'eau...)
- Le « voisinage semencier », c'est-à-dire la négociation avec les producteur voisins pour pouvoir implanter une production de semence (éloignement), et/ou l'existence d'un décret de protection des semences pour l'ilot, auquel cas les agriculteurs peuvent être forcé de mettre en œuvre une production semencière ou au contraire ne pas pouvoir.

4. Le type d'exploitation.

C'est surtout la présence ou non d'élevage sur l'exploitation qui déterminera la présence de SdC productifs de fourrage : maïs ensilage ou grain dans les coteaux, ainsi que de prairies. Le chargement (UGB/Ha) peut déterminer une irrigation ou non des prairies temporaires.

5. La trajectoire de l'exploitation.

Les acteurs ont pointés deux phénomènes principaux dans les exploitations qui limitent les surfaces irriguées en favorisant le développement en sec :

- La tendance à spécialisation des exploitations (baisse de la main d'œuvre, Age des exploitants, baisse de la pénibilité du travail)
- La tendance à l'agrandissement des exploitations, ce qui a pour conséquence la baisse de l'irrigation et l'apparition SdC en sec dans les zones traditionnellement irriguées.

Dans les deux cas, c'est une baisse de la disponibilité de la main d'œuvre qui est en jeu.

6. **Le marché.** Les prix des intrants et d'achat des productions orientent jusqu'à 20% de l'assolement selon les acteurs présent lors de la rencontre.

Liste des SdC

Le tableau suivant présente la liste des systèmes de culture établis, censée représenter le territoire dans ses grandes lignes. Les participants ont explicitement énoncé qu'elle ne représente pas la diversité que le peu rencontrer.

	SdC	Rotations type	Espèces cultivées / description complémentaire
irrigués	Arbo (int) Vergers des terrasses alluviales		Pommes et kiwis Plus irrigué, production en quantité
	Arbo (ext) Vergers des coteaux		Prunes Moins d'irrigation, vente locale
	M* monoculture maïs irrigué	Maïs	Maïs sous contrat, 'conso' ou ensilage. V irrigation constants

	M*_{rg} monoculture maïs irrigué, Ray Grass en dérobé	Mais	Mais et Ray Grass Semis plus tardifs, besoins de beaucoup d'irrigation
	Pt*_{irr} Prairie Temporaires irriguées	Pt* Pt*/Cer	Luzernes, dactyles, mélanges
	M*_{sem} Monocultures maïs semence		Mais semence
	M_{sem}/autre Maïs semences en rotation avec blé, tournesol semence ou colza semence	Mais/blé	Mais semence, Céréales, Tournesol ou colza semence
(suite)	SdC	Rotations type	Espèces cultivées / description complémentaire
sec	-Cer-/Tour Grande culture sec extensive	Cer /... / Tour	Blé _t , Blé _t -améliorant, Blé _d , Orge ; Tournesol
	-Cer-/tour_(ts) Grande culture sec extensif travail simplifié	Cer/... /Tour _(ts)	Idem Travail simplifié pour la structure du sol
	Colza/-Cer-/tour Grande culture en sec intensive	Colza/Cer/.../Tour	Idem + colza Forte mécanisation, rendement élevés
	Pt* Prairie temporaire sec	Pt* Pt*/Cer	Luzernes, dactyles, mélanges

Tableau 2 : tableau des SdC représentatifs de la zone

Précision des critères d'existence des SdC

Le tableau suivant présente les SdC et les critères déterminants leurs mises en œuvre tels qu'ils ont été listé par les participants. En rouge, Sont présentés des critères d'existences complémentaires, issus d'un retour sur l'enregistrement de l'atelier, ainsi que sur des connaissances acquises par les premiers entretiens réalisés.

SdC	Critères d'existence					
	Spatiaux			Non Spatiaux		
	<i>Contexte pédo morphologique</i>	<i>contexte semencier</i>	...	<i>Structure/Type exploitation</i>	<i>Irrigation</i>	...
Arbo (int)	Terrasses (alluvion et bonnes bouldières)			Grandes surfaces disponibles, proches du siège Historique exploitation : concentration des surfaces depuis 1950		
Arbo (ext) prunes	Coteaux, pentes			Petites surfaces Stock d'eau limité (? Présence ASA pour garantir l'antigel : bcp débit)		
M*	Terrasses (Alluvions et bonnes bouldières) Terres bien drainantes Grands ilots			Disponibilité de l'eau borne ASA, part fixe élevée et cout au m3 bas pivot		
M* _{rg}	Idem			Idem Présence de l'élevage sur l'exploitation		
M/Cer	Coteaux (monoculture impossible car sols)			Exploitation ayant élevage (maïs ensilage ou grain)		
Pt* _{irr}	Terrasses moins bons sols (mauvaises bouldières)			Présence de l'élevage sur l'exploitation (chargement important donc objectif de rendement élevé)		
M* _{sem}	Très bons sols des terrasses (Alluvions Ilots semences sur Réseau ASA			Facilité et sécurité d'irrigation lac collinaire perso		
M _{sem/autre}	Coteaux Pas ilot protégé pour le maïs semence (fonction du voisinage semencier)			Facilité et sécurité d'irrigation		

	Réseau ASA, Proximité lac... Peu de pente, grand ilots	
-Cer-/Tour	Sols plus lourds, de coteaux En plaine les parties non irriguées : - Coins des ilots irrigués - éloignées	Exploitation en transition vers la simplification (ex. âge) : Soit - diversifiée en voie de simplification (MO, âge de l'exploitant) - réduction de l'irrigation
-Cer-/tour (ts)	idem	Idem Dynamique de limitation des intrants
Colza/-Cer-/tour	Terrasses, grandes surfaces, grands ilots	Exploitation en transition vers l'extension des surfaces et la réduction de l'irrigation
Pt*	Terrasses, loin de l'exploitation coteaux	Présence de l'élevage sur l'exploitation (chargement léger donc objectif de rendement moyen)

Tableau 3 : tableau des SdC représentatifs de la zone et de leurs critères de distribution

Zonages

Ces deux images sont des copies numérique des travaux effectués sur carte lors de l'atelier.

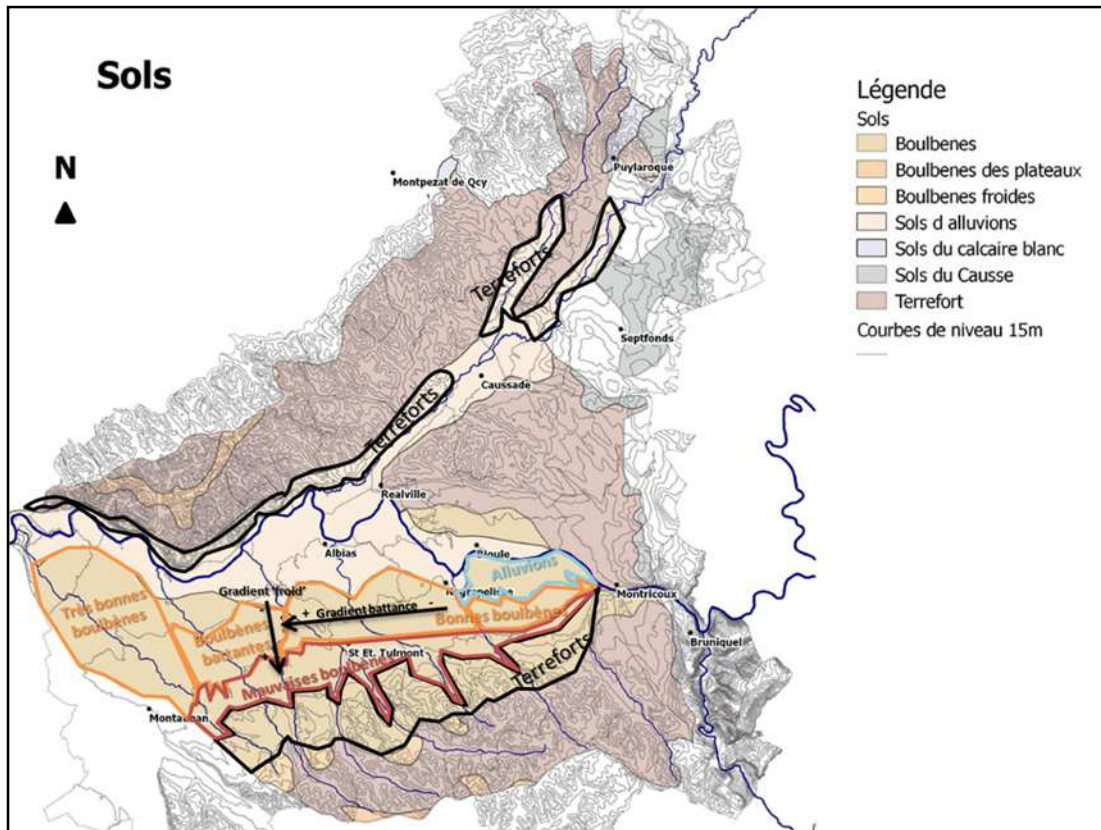


Figure 7 : traduction numérique du poster utilisé pour le zonage à dire d'acteur des sols du territoire

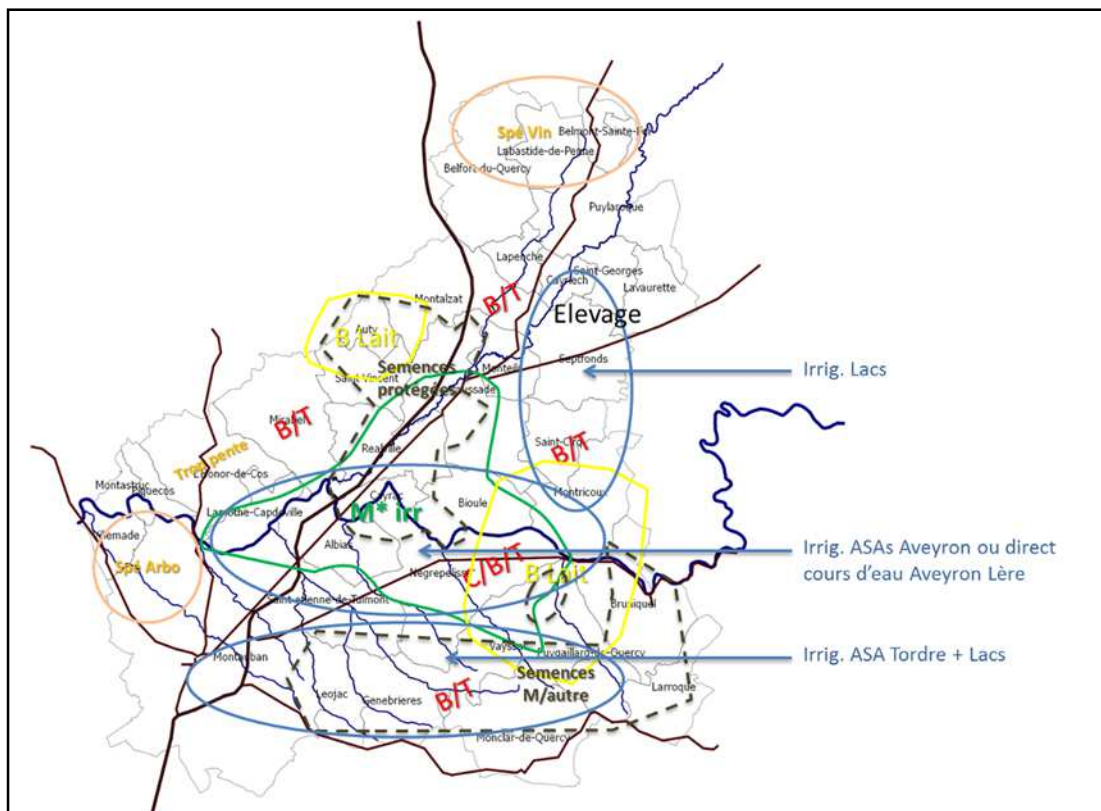


Figure 8 : traduction numérique du poster utilisé pour le zonage des SdC

5 Traitement des résultats : vers un échantillonnage

Le traitement des résultats du ZADA a consisté à mettre le zonage réalisé en parallèle des informations issues du RPG à des fins d'échantillonnage du territoire.

Cette section ne cherche pas à présenter ce travail, toujours en cours, qui fera par la suite l'objet d'un article scientifique, mais à présenter des premiers résultats en vue d'un échantillonnage pour le stage de Jonas Hipolito.

Formalisation des données spatiales du ZADA

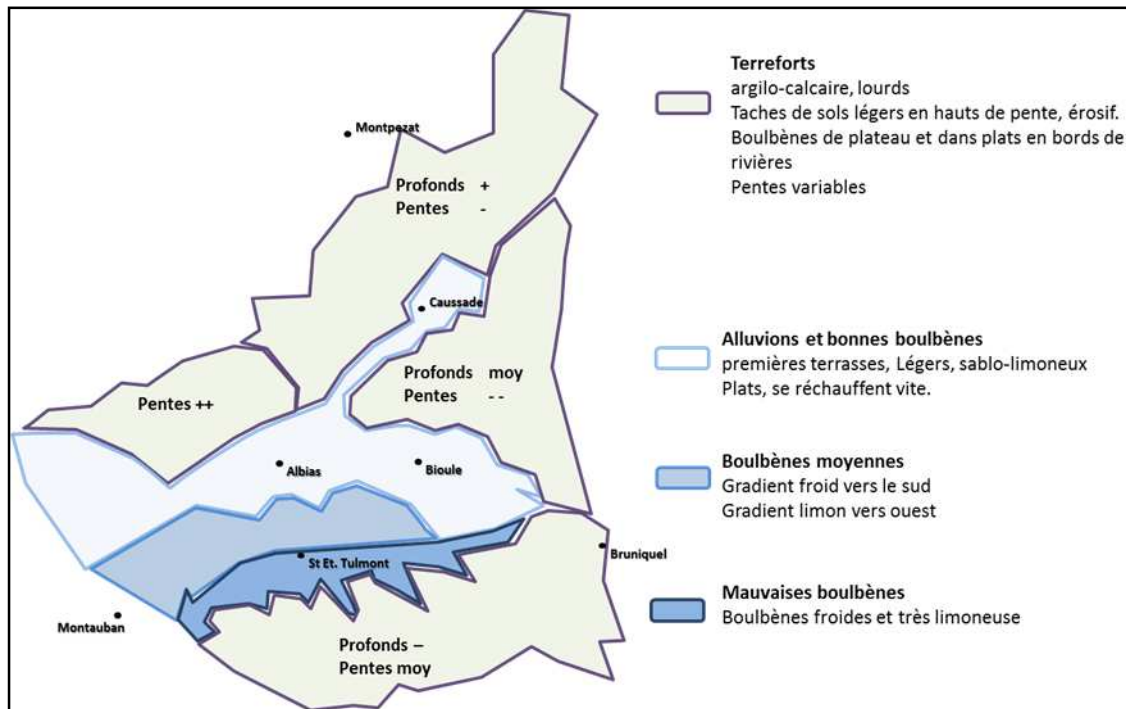


Figure 9 : Formalisation des catégories pédologiques définies par les acteurs lors du zonage des sols, issu de la figure 7

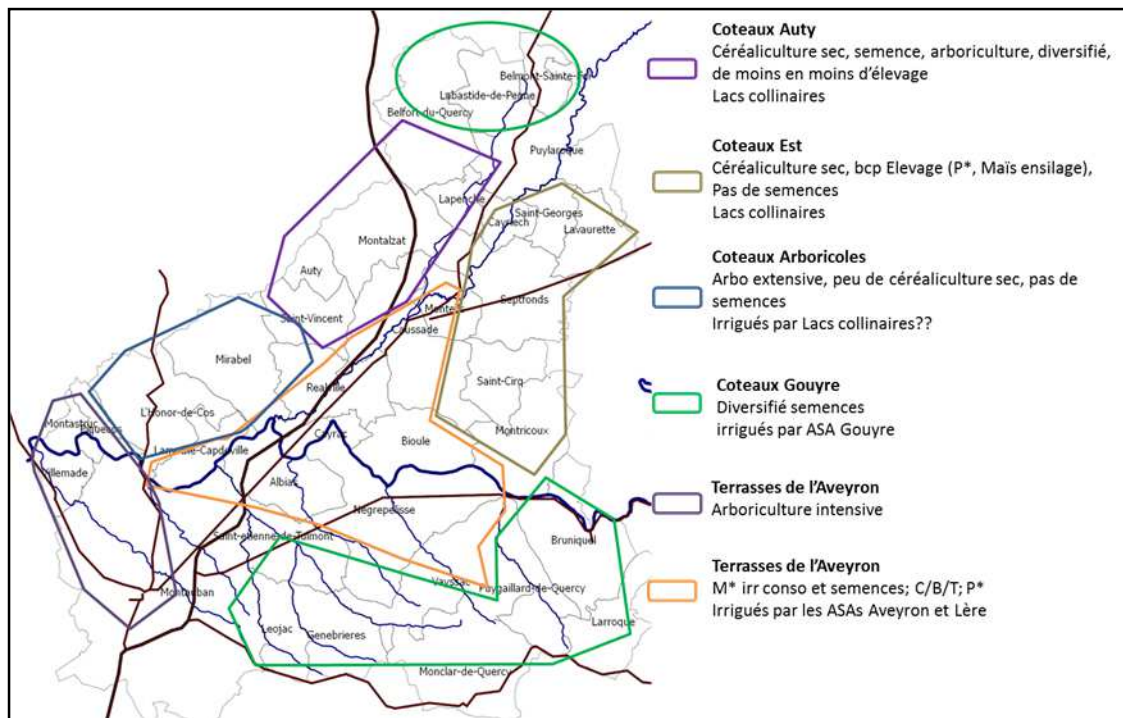


Figure 10 : formalisation du zonage des systèmes agricoles du territoire, issu de la figure 8

Réaliser un échantillon

Le zonage suivant a été retenu pour caractériser les situations agricoles du territoire. Il synthétise les informations des cartes en figure 9 et 10 et prend en compte les SdC listés dans le tableau 3.

Les zones de coteaux ont été différenciées car elles n'ont pas les mêmes contextes pédo-morphologiques, la même forme d'utilisation à l'eau, la même historique de production (élevage, fruitiers).

La zone de plaine a gardé une certaine unité car les critères non spatiaux (type d'exploitation) semblent prédominer sur la variabilité des critères spatiaux.

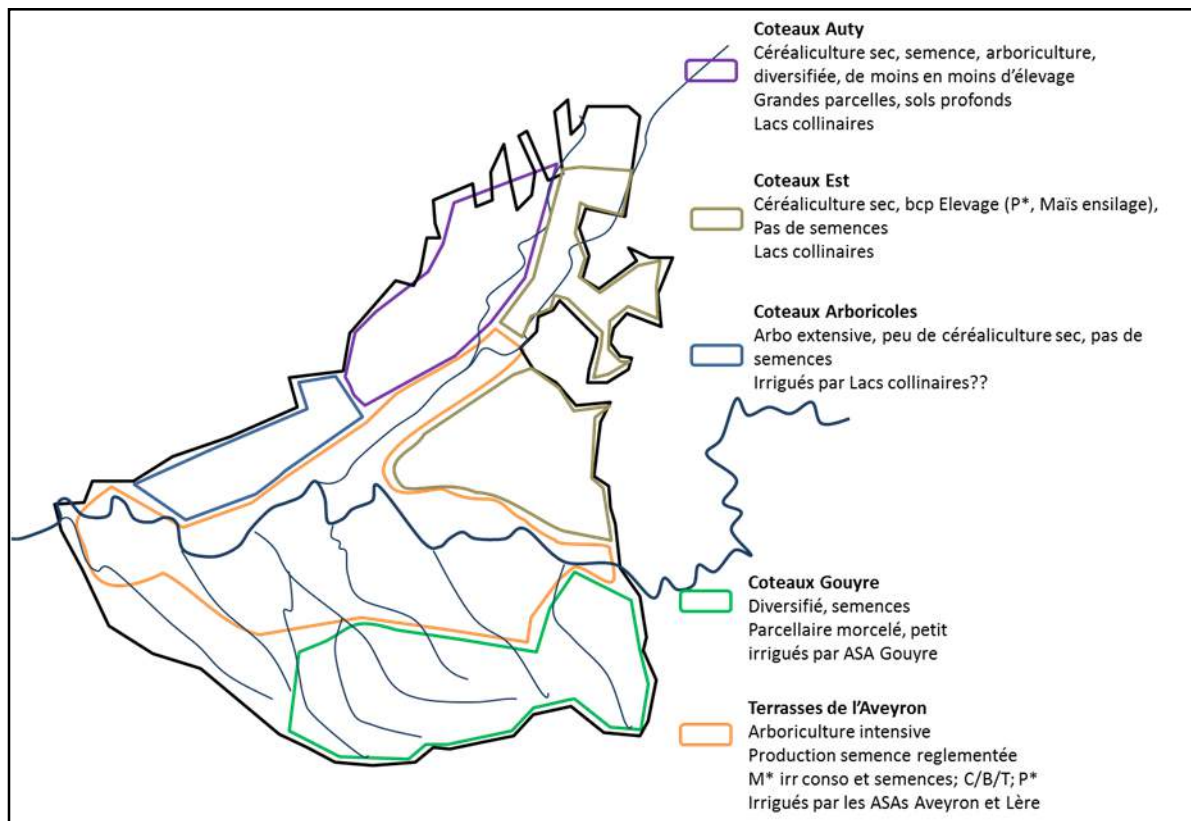


Figure 11 : zonage retenu pour la constitution de l'échantillon à enquêter

A partir de cette carte des situations agricoles, nous avons créé un échantillon d'exploitations à enquêter afin de décrire les SdC principaux du territoire et évaluer la variabilité spatiale des pratiques associées aux rotations dans le territoire.

Le tableau 4 en page suivante présente les situations agricoles retenues, les SdC qui en sont représentatifs, et les exploitations types que nous pensons trouver dans chacune des situations. Ce tableau doit servir de base pour la recherche d'exploitation à enquêter.

	Contexte pédo morphologique	Historique / contexte socio éco	Contexte eau d'irrigation	Communes	SdC principaux	Exploitations types
Terrasses de l'Aveyron	Bonnes bouldières et alluvions Grandes parcelles pivots	Grandes exploitations Arboriculture / maïsiculture semences maïs (Nombreux ilots protégés) irrigation conséquente	Eau disponible (ASAs, V Autorisés élevés) Soumise à restrictions Taux irrigation des surfaces élevées.	Bioule, Negrepelisse Albias, St Et. Tulmont, Réalville, Lamothe-capdeville, Villemade, Montauban Caussade	<ul style="list-style-type: none"> • M*_{sem} • M* • B/T (coins) • C/B/T • Arbo int • P*_{irr}/P* 	<ul style="list-style-type: none"> • Semencier • Arboriculteur • Polyculture élevage • Maïsiculture grain
coteaux arboricoles	Terreforts très pentus	Production arboricole de petite échelle débouchés locaux	ASA arboriculture	L'honors de Cros, Mirabel	<ul style="list-style-type: none"> • Arbo ext • P* • B/T 	<ul style="list-style-type: none"> • Arboriculteur prunes/abricots type ventes locale
Coteaux Quercy blanc	Terrefort profonds, peu pentus	Exploitation diversifiées, historique semences diverses, melon, élevage lait. Trajectoire générale vers la simplification et l'extension des surfaces Melon concentré sur des zones exploités par les 'faiseurs'.	Irrigation par lac collinaires	Saint Vincent, Auty, Montalzat, Lapenche, Belfort du Quercy	<ul style="list-style-type: none"> • M/autres_{sem} • M/autre • B/T • Arbo ext • P* 	<ul style="list-style-type: none"> • Polyculture élevage • Semencier / grandes cultures • Arboriculteur (+semences) • melon

Coteaux Gouyre	Terrefort peu profondes, peu pentues, Présence de zones plates proches de cours d'eau	Idem sauf melon, tendance vers la grande culture	Irrigation ASA Gouyre. Prévisibilité des stocks disponibles	Bruniquel, Vayssac, Puygaillard de quercy, Montclar, Genebrière Leojace, Saint Etienne de Tulmont	• idem	• idem
Coteaux est	Terrefort moyennement profondes, peu pentues	Historique élevage laitier	Peu d'irrigation	Puylaroque, Saint Georges Cayriem, Septfonds, Lavalette, Saint Cirq, Montricoux, Caussade	• M/autre (conso et ensilage) • B/T • p*	• Exploitation polyculture élevage

Tableau 4 : Table des situations agricoles identifiées, et listes des SdC et types d'exploitations agricoles à enquêter.

Annexe 21 Conception d'alternatives territoriales pour les systèmes de culture

13 Mars 2013 – ATELIER PARTICIPATIF – Compte-rendu

Organisé et animé par Clément MURGUE, INRA UMR AGIR

A la mairie Bioule

Remerciements :

A la mairie de Bioule, pour la mise à disposition de leurs locaux

Aux participants, pour le temps et l'intérêt qu'ils consacrent à mes travaux

A mes encadrants, pour leur accompagnement dans ce travail

1 PRESENTATIONS

1.1.21.1 Tour de table

Les noms des personnes présentes sont marqués sur post-it et localisés sur la carte (cf. figure 1 page 2)

Jean-François Larrieu : Technicien Irrigation et production biologique en arboriculture.

Alain Batut : exploitant à Bioule (céréales, maïs et élevage bovin), président ASA du Gallon.

Frédérique Beaufiles : exploitant à Nègrepelisse (céréales, maïs et élevage bovin), 36ha irrigables, président ASA de Nègrepelisse Est.

Michel Savignac : Exploitant, représentant l'ASA du Bridou

Didier Alcouffe : Technicien au syndicat des producteurs de semence de maïs du Quercy, à Montauban

Alain Fraysse : Exploitant (céréales et soja Bio)

Josian Palach : Exploitant sur les coteaux du Quercy, représentant de la confédération paysanne Tarn et Garonne

Olivier THREOND : unité AGIR : chercheurs INRA, ENSAT, Purpan : élaboration d'outils de modélisation pour aider à la gestion de l'eau quantitative à l'échelle territoire. Agronomes

Delphine BURGER LEENHARDT: même unité et équipe : spatialisation des systèmes de culture à l'échelle territoire. Delphine et Olivier assurent l'encadrement de Clément

Excusés : Christian Leray (CA 82), Elodie Bessonnet (CA 82), Robert Pages (producteur Tordre), Joel Bede (producteur Réalville), Yves Delamarre (président ASA du Gouyre), Francis Bourges Girbaud (ASA St Nazaire), Bastien Cler (CUMAS Tarn et Garonne)..

1.1.21.2 Programme de l'atelier

Phase 1 : présentations : objectif de l'étude, attentes des participants, introduction de la question ;

Phase 2 : élagage du sujet par un brainstorming ;

Phase 3 : précision, approfondissement du contenu des solutions élaborées.

1.1.21.3 Localisation du territoire étudié

La zone aval du bassin versant de l'Aveyron et du bassin de la Lère : autour de Caussade, Albias, incluant les zones de coteaux du Quercy Vert (Genebrière) et de Montalzat, Puylaroque.

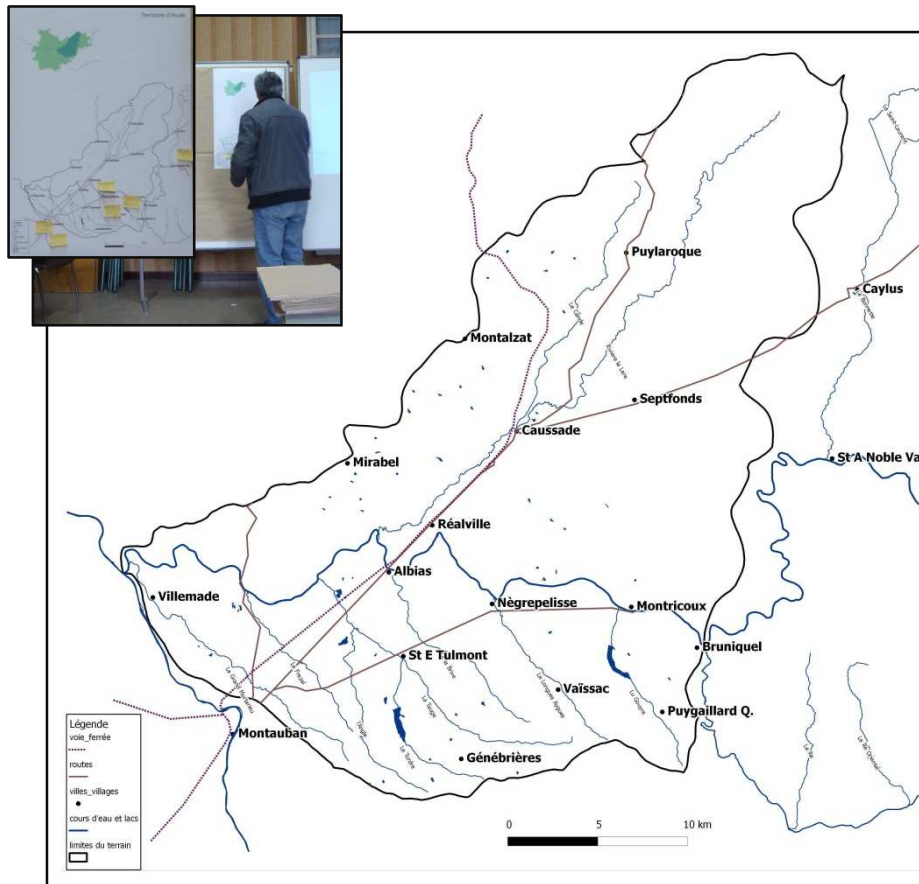


Figure 12 : Photo du poster utilisé pour situer le territoire d'étude et pendant le tour de table

1.1.21.4 Pourquoi cet atelier ?

5 slides de power point puis discussion

..1.1.a...1.1 Le projet de thèse

Quoi ?

L'atelier s'insère dans le cadre du travail de thèse de Clément Murgue: concevoir, modéliser et simuler des distributions spatiales de systèmes de culture en vue de leur évaluation pour lequel il est à mi-parcours, un an et demi d'accompli. Son travail consiste à :

- **Explorer les possibilités de changement :**

Imaginer des alternatives possibles. On ne cherche pas des options en rupture avec les pratiques actuelles, mais plutôt qui intègrent les pratiques, les techniques, les systèmes économiques et commerciaux en place.

- Simuler les actions, les prises de décision, dans le temps et dans l'espace

Avec une approche fine du territoire, depuis l'ilot de cultures au bassin versant. Le processus consiste à croiser l'information des bases de données (RPG, AEAG, Banque Hydro) avec l'avis et la connaissance des acteurs de terrain (entretiens, ateliers) pour construire une modélisation cohérente et transparente.

- Prendre en compte la variabilité climatique :

Les simulations se feront dans des conditions climatiques variables, a priori à partir d'observations météo sur 4 points du territoire depuis 2002 à 2012. Ces années pourront être mélangées pour simuler des décennies plus sèches ou plus humides (ex. plus d'années type 2003 et 2011 pour une décennie sèche).

- Qualifier et évaluer les possibilités identifiées :

La simulation doit permettre de calculer des indicateurs pour évaluer le potentiel des alternatives à assurer la viabilité des exploitations (critères à définir avec les acteurs agricoles) et à favoriser une GQE de l'eau durable (critères à définir avec les garants de la LEMA sur le territoire).

Pourquoi ?

- Car la société soulève des préoccupations environnementales : la LEMA 2006 demande aux agriculteurs de réduire leurs prélèvements pour faire face au déficit structurel. Il est devenu difficile de mettre en œuvre de retenues.

- Car une réflexion est à mener sur la sensibilité des systèmes de culture vis-à-vis de la variabilité climatique. La recherche propose d'accompagner les agriculteurs dans cette réflexion.

- Pour fournir des outils aux gestionnaires de l'eau permettant de gérer quantitativement l'eau. Ils permettront de simuler le comportement d'un territoire irrigué pour aider à la décision.

--> L'Etat demande aux gestionnaires et aux chercheurs de chercher des solutions dans **la gestion des assolements et des pratiques pour gérer la demande** : pas seulement pour des économies, mais aussi **une meilleure connaissance des besoins dans le temps et l'espace afin d'optimiser les volumes stockés**.

Choix de la zone d'étude :

Il se justifie par les enjeux liés au déficit structurel de l'eau et les conflits que la problématique génère.

- La taille du territoire retenu est adaptée à ce type d'approche.
- Il a été établi en consultation avec l'Agence de l'Eau,
- ses limites sont les limites hydrographiques.
- Il a été arrêté au début des Causses pour simplifier la modélisation.
- Il présente une certaine unité des systèmes de production en place

Eléments du modèle pour la simulation :

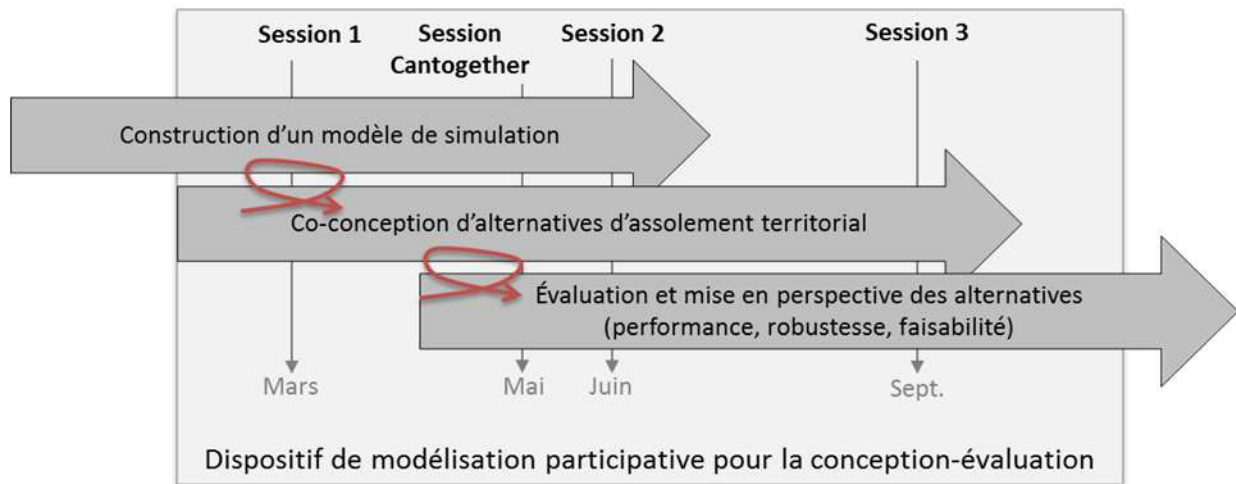
- Des éléments de structure du territoire :
 - o Agricoles : la distribution spatiale des systèmes de cultures (rotations et pratiques associées) à l'échelle de l'ilot de culture
 - o Hydrologiques : les cours d'eau, les réserves et leurs connexions
 - o hydrauliques : les connexions entre les points de prélèvements et les ilots de culture
- Des éléments de dynamique pendant l'étiage
 - o La croissance des plantes dans les ilots (fonctions des pratiques)
 - o L'écoulement de l'eau dans les cours d'eau, via la variation des débits sur l'Aveyron et la Lère
- Des éléments décisionnels :
 - o tactiques des agriculteurs sur les pratiques en fonction du climat

- lâchers et de restriction des gestionnaires de l'eau

Programme du dispositif participatif pour 2013 :

3 sessions de conception participative sont organisées :

- Atelier 1 : construction l'alternatives : propositions de changement
 - o 13 mars : acteurs de la profession agricole
 - o 14 mars : acteurs garants du bon état des cours d'eau (macro-acteurs, gestionnaires, associations pour la protection de l'environnement)
- Atelier 2 : Qualification et évaluation des propositions (mois de Juin)
- Atelier 3 : Nouvelle session de propositions et leur évaluation (mois d'Octobre)



Objet de la réunion

L'objet de la réunion est de réaliser un atelier de conception participative autour de la question :

Quels systèmes de culture sur le territoire pour assurer la viabilité des exploitations et favoriser la gestion des étiages ?

L'objectif était d'identifier une ou plusieurs alternatives de distribution spatiale des systèmes de culture dans le territoire, pour une simulation en laboratoire et un retour au mois de juin.

1.1.21.5 Attentes des participants

..1.1.a...1.2 Quelles sont vos attentes vis-à-vis de la journée ?

On appose les cartons sur le tableau en précisant celles qui entrent dans le cadre de l'étude et les autres

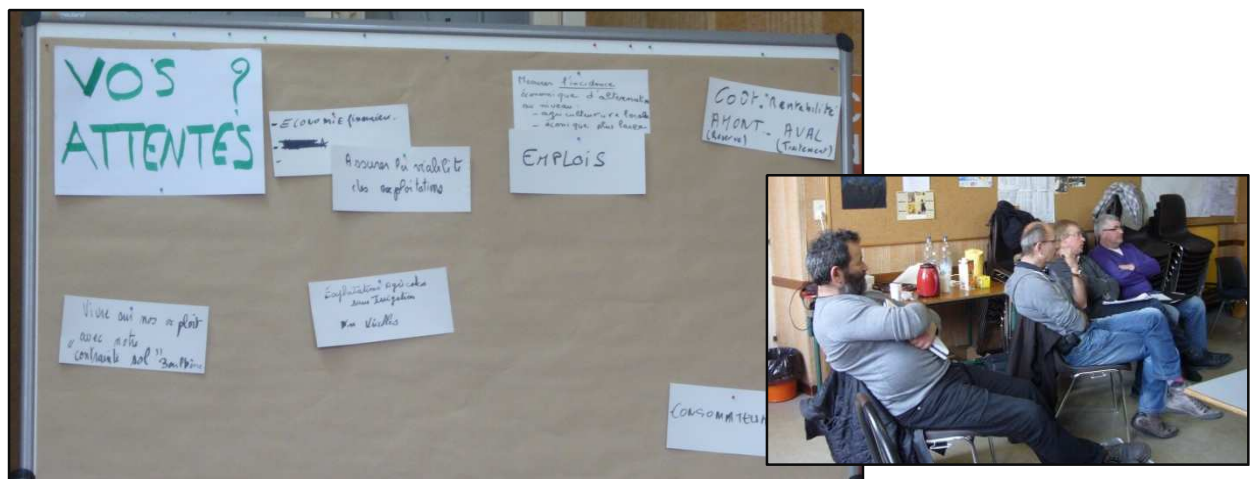


Figure 13 : photo du travail d'expression de leurs attentes par les participants

Tableau 5 : Liste des attentes des participants et commentaires.

Intitulé du carton	Précision, recadrage
Assurer la viabilité des exploitations	La viabilité économique des exploitations est à prioriser. Elles sont source de revenu pour une bonne partie des habitants sur le territoire.
Mesurer l'incidence économique d'alternatives au niveau : - agriculteur - économique plus large	Il faut pouvoir, par le modèle, qualifier les conséquences économiques sur les exploitations mais aussi sur le territoire, notamment en incluant des représentants des filières agricoles comme les coopératives et les semenciers.
Economie financière Vivre sur nos exploitations avec notre contrainte sol (Boulbène)	Les boulbènes nécessitent un drainage et une irrigation, les cultures d'hiver sont difficiles à mettre en œuvre, le maïs irrigué est le meilleur moyen de mettre ces sols en valeur.
Exploitation agricoles sans irrigation non viables	idem
Coût-rentabilité : Amont (réserve)-aval (traitement)	Le cout de l'irrigation et des systèmes de culture en place est trop élevé (cout sociétal), le modèle doit pouvoir permettre de montrer cela.
Consommateur	Changer les habitudes des consommateurs pour trouver des débouchés autres
En temps Réel	Il faut fournir aux gestionnaires une information précise dans le temps pour qu'ils puissent optimiser leurs lâchers et éviter le gaspillage au-dessus du DOE.
Emplois	Idem carton économie du territoire.

..1.1.a...1.3 *Groupes d'attentes et réponses potentielles de l'étude*

On groupe les cartons en organisant les idées qui se ressemblent.

Il se dégage 2 groupes d'attentes principaux, révélateurs des critères manipulés par les participants pour l'évaluation du territoire.

- **Expliciter les conséquences économiques des changements**, à l'échelle des exploitations (revenu pour les exploitants) ainsi qu'à l'échelle du territoire (emplois dans le secteur agricole)

C'est effectivement un objectif principal de l'étude, qui considère que favoriser la gestion des étiages n'est envisageable que dans le cas où la viabilité des exploitations est assurée. Le simulateur doit permettre de calculer des indicateurs rendant compte des conséquences économiques des propositions d'alternatives au niveau des parcelles (ex. marge brute / culture ou / système de culture), des exploitations, mais aussi du territoire. Ces indicateurs seront mieux définis lors des prochains ateliers, lorsque le simulateur sera déjà fonctionnel.

Cependant, le simulateur n'intégrera pas un modèle économique complexe, par exemple qui représente les flux et l'évolution des prix dans les filières agricoles, mais se concentrera sur un calcul de marge et de temps de travail pour les exploitants. L'évaluation à l'échelle du territoire pourra se faire par expertise à partir des données sur les quantités produites.



➤ **Développer un outil pour accompagner la gestion des étiages, en cours de saison à une échelle de temps et d'espace fine.**

- La plateforme de simulation développée doit en effet permettre de simuler le comportement du territoire irrigué au jour le jour, dans des conditions climatiques variables. Elle pourra être utilisée pour réfléchir à une gestion stratégique/tactique des lâchers en adéquation spatiale et temporelle avec le besoin des cultures², mais ne prendra pas la forme d'un outil de pilotage opérationnel pour les gestionnaire.

Par contre, le modèle du territoire irrigué ne permettra pas de simuler les situations transitoires vers les alternatives exprimées. Par exemple, dans le cas d'une simulation de changement d'espèces cultivées, nous nous intéresserons aux conséquences techniques et économiques sur les exploitations, sans chercher à simuler les prérequis sociétaux (changement de comportement des consommateurs) qui sont induits.

Enfin, les aspects qualitatifs de la gestion de l'eau seront laissés de côté.

2 BRAINSTORMING

La question suivante a été posée :

Sur le territoire,

quelles pratiques d'irrigation ou de cultures, et quels assolements,

permettraient de faciliter la gestion des étiages et assurer la viabilité des exploitations ?

D'abord une **phase exploratoire** a permis de faire le tri des idées qui prenaient sens pour le groupe, puis une **phase d'organisation et de hiérarchisation des idées** a permis de cibler les options qu'il serait préférable d'articuler dans une proposition d'alternative à simuler.

² Les gestionnaires actuels de l'eau (DDT et conseil général ont avancé le besoin d'une information sur les besoins à l'échelle de la semaine et sur les petits bassins versants.



Figure 14 : photos du travail de brainstorming (à gauche), et des résultats de l'organisation des idées.

...1.2.a...1.1 Phase exploratoire

L'idée est de collecter l'avis des acteurs en ouvrant l'espace imaginaire. Les règles du jeu :

- lister sur cartons les idées en vrac
- Sur les cartons bleus : sélectionner, 2, 3 à 4 idées principales à mettre en avant en priorité.
- Les cartons sont apposés sur le tableau, ordonnés en catégories, ajout de précisions.

Tableau 6 : Cartons proposés pour option de changement et explicitation

Intitulé	Précision
1. Dates de semis	Semer plus tôt pour profiter de toute la RU du sol
2. Autres semences, difficile : contraintes supérieures (Rotation, isolement, maladies)	Faire des semences qui nécessitent moins d'eau (ex. tournesol) mais les contraintes de retour (4 ans) et d'isolement (400m) le rendent compliqué. Semence de culture d'hiver → peu de demande
3. Nouvelles variétés	De maïs, + « économes » en eau, type OGM avec par ex. un gène du Sorgho, + précoces pour murir avant la période critique
4. Baisse des intrants	En lien avec l'option 7, des systèmes moins intensifs avec des rendements moindres nécessitent moins d'eau
5. Optimiser apports	Approche technologique, grâce à des tensiomètres, afin d'éviter des apports trop importants

6. Optimiser les lachures	Via la remontée de l'information sur les surfaces irrigués : connaitre la distribution spatiale/temporelle des besoins
7. Amélioration efficacité : - Approche climatique - Approche sol (+20%) - Approche plante	Une amélioration via une approche « système », c'est-à-dire qui prenne en compte tous les facteurs agronomiques utilisable et les articule.
8. Variété tardives	Les variétés tardives peuvent valoriser les orages de fin d'été
9. Sans labour	Possible dans certains sols seulement (légers), il permet de favoriser l'infiltration et donc augmenter la RU, minimiser les doses d'irrigation.
10. TCS	Idem
11. Base de données	Pour faciliter l'échange d'information avec les gestionnaires afin d'optimiser les lâchers pour les mettre en adéquation avec les besoins.
12. Recensement via la PAC des surfaces irriguées	Idem 11
13. Connaissance des pratiques	Idem 11, mais il faut non seulement connaitre les espèces, mais aussi les variétés, les dates de semis, ainsi que les objectifs de production.
14. Efficacité économique	
15. Evolution en arboriculture de m'aspersion sur frondaison à la micro aspersion	50% des surfaces en arbo peuvent évoluer vers des techniques d'irrigation plus efficaces.
16. Augmenter le stock dans le sol	Voir 11., Via des techniques de travail du sol différentes (simplifiées)
17. Rotation de cultures	Remplacer le maïs par des cultures d'hiver, au moins insérer une culture d'hiver dans les monocultures de maïs
18. Assolement Réflexion	Voir 17., Réfléchir l'assolement en fonction de la disponibilité de l'eau
19. Variétés précoces (mures au 15 Aout)	Des variétés plus précoces, semées plus tôt pour faire des économies d'eau en période de restriction (besoin avant les restrictions)

1.1.21.6 Catégorisation des options de changement, hiérarchisation

Une discussion a été menée pour grouper les options citées qui se ressemblaient. Les participants devaient tenter d'attribuer des noms de catégories à des options qui se rapprochent ou peuvent fonctionner ensembles. Chaque personne doit placer 1 ou 2 gommettes sur le ou les grands objectifs qu'ils souhaitent prioriser.

Voir la Figure 14 : photos du travail de brainstorming (à gauche), et des résultats de l'organisation des idées., Les idées ont d'abord été organisées en groupes qui ont été nommées. Puis les groupes ont été organisés sur le tableau de façon à positionner :

- en haut les **options de changement les plus techniques**, portant sur l'échelle d'un ilot de culture ;
- Au centre, les **changements sur l'exploitation** qui rassemblent les options techniques
- En bas, l'idée d'un travail **d'échange d'information à l'échelle du territoire** pour optimiser la gestion des stocks par les gestionnaires.

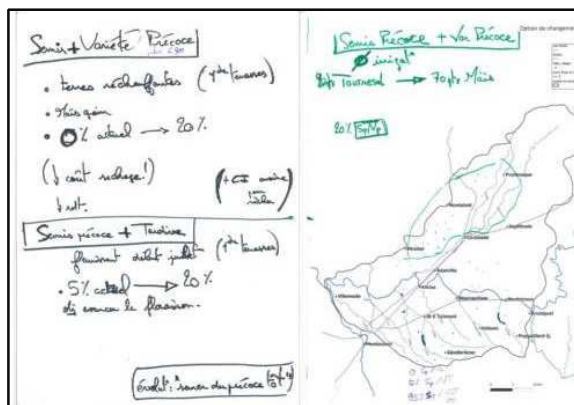
3 APPROFONDISSEMENT DES OPTIONS

Sélectionner les options de changement et essayer de répondre aux questions:

- qu'est ce qui change ? Quoi ?
- Dans quelles situations ? Quel endroit ? Où ?
- Qui est concerné ? Qui ?

Se concentrer sur les points à prioriser.

Support : la carte + une page accolée pour prise de notes, en en-tête l'objectif à prioriser



1.1.21.7 Jouer sur les dates de semis et les précocités

Figure 15 : Feuille de travail utilisée pour l'approfondissement des options choisies pour cette proposition

3 options ont été retenues et approfondies, toutes trois portent sur la sole de maïs.

➤ Semis précoce / Variétés précoces

Quoi : Décaler le pic de besoin (floraison) à une période moins critique (plus tôt), tout en visant le marché de soudure avec des prix hauts.

Où : Possible sur les premières terrasses où le semis peut se faire tôt (terres *rechauffantes*)

Objectif : passer De 0% de la sole à 20% max

Rmq :

Le rendement envisagé est plus bas,

Le marché de soudure n'existe plus vraiment,

Moins de frais de séchage (coûts qui augmentent en ce moment)

➤ Semis précoce / Variétés tardives

Quoi : Assurer des rendements très élevés en décalant la floraison où les restrictions ne sont pas commencées, tout en recherchant les orages de fin de saison.

Où : Possible sur les premières terrasses où le semis peut se faire tôt.

Objectif : passer De 5% de la sole à 20% max

➤ **Semis précoce / Variété Précoce, en sec**

Quoi : Utiliser des variétés très précoces (indice < 300), récoltées en septembre

Où : ilots en argilo calcaire, sur les coteaux où la RU est plus grande : zone Mirabel, Montalzat, Puylaroque (en vert sur la Figure 15 : Feuille de travail utilisée pour l'approfondissement des options choisies pour cette proposition).

Rmq : impossible sur les coteaux du Gouyre, au moins dans les zones les plus profondes ?

1.1.21.8 Mettre les maïs en rotation avec des cultures en sec / moins consommatrices

➤ **Utiliser le blé et le Sorgho**

Sorgho

Récolter Octobre, à 50qtx.

Peut se faire tous les 3 à 5 ans car il « assèche » le sol en nutriments (20% de la sole maïs)

La question du marché a été soulevée, avec une inconnue sur les prix de vente.

Blé

C'est une pratique actuelle (20% de la sole), qui est majorée si les réserves sont vides en fin d'étiage et que les périodes de semis de blé sont favorables.

Les céréales d'hiver sont impossibles dans les boubènes hydromorphes.

On pourrait passer de 20 à 40% de la sole maïs si les conditions hivernales/prix à long terme sont favorables.

Exemple de rotation

Les participants ont cité l'exemple d'une **rotation Blé/maïs/.../Sorgho**, avec un retour du sorgho tous les 3 à 5 ans, et du blé tous les trois ans en fonction des conditions climatiques au semis et des prix.



➤ **Intensifier la production en sec (Tournesol après culture d'hiver)**

Tournesol à 2 tours

Insérer un tournesol après une culture d'hiver, semé fin juin avec 2 tours d'eau. C'est possible sur les meilleures terrasses (légères).

Exemple de succession orge-tournesol / maïs

Les participants ont donné l'exemple d'une **succession orge-tournesol /maïs**, en précisant que ceci serait coûteux en travail et en matériel.

➤ **Autres espèces discutées mais non retenues :**

Soja : Rendement plus aléatoire que le maïs, et il faut autant d'eau... pas une si bonne idée

Colza : Problème de traitement/conduite technique

Luzerne : Difficultés techniques pour peu ou pas d'effet sur l'eau :

- Pas possible dans les sols drainés --> bouche les drains ;
- Difficile d'avoir une bonne qualité ;
- Travail contraignant (la nuit) ;
- Pas assez d'éleveur pour avoir des débouchés ;
- Utilise + d'eau que le maïs (2 tours/coupe), sauf si on bine après chaque coupe.

..1.3.a...1 Propositions retenues pour la simulation

Les propositions de changement retenues pour la simulation articulent les options citées et approfondies plus haut :

- Dans les ilots arboricoles, possibilité d'amélioration de l'efficacité d'irrigation (baisse des besoins de prélèvements sur 50 % des surfaces ;
- Sur la zone des terrasses (alluvions et bonnes bouldières) changement dans la sole de maïs grain :
 - o La sole actuelle de maïs est remplacée à 20% par du sorgho, en insérant une année de sorgho tous les 5 ans dans les rotations blé/maïs et dans les monocultures de maïs ;
 - o Certains agriculteurs pratiquent la culture du tournesol après la récolte d'une céréale ou d'un pois d'hiver ;
 - o 20% de la sole en maïs : semis précoces, variété précoce ;
 - o 20% de la sole en maïs : semis précoces, variété tardives ;
- La sole actuelle de blé augmente à 20% dans les années favorables (climat), au dépend des surfaces en maïs, sauf dans les zones de « mauvaises bouldières » ;
- Sur les sols argilo-calcaires profonds, tout ou partie des maïs sont semés précoces avec des variétés précoces et en sec (max 2 tours d'irrigation).

Ces différentes options peuvent être combinées de manières différentes pour composer une « alternative de distribution spatiale des systèmes de culture sur le territoire », qui sera simulée grâce à un modèle.

Le modèle étudiera l'impact de ces changements de manière indépendante ou combinée, sur une série d'année climatique connue (de 2002 à 2012), en calculant leurs effets sur:

- Des critères économiques :
 - o le temps de travail des agriculteurs
 - o la marge brute dégagée par les systèmes de culture
 - o L'emploi agricole à l'échelle du territoire
 - o Les filières de commercialisation (notamment les semences)
- Des critères de gestion de l'eau :
 - o DOE journalier à Loubejac et Réalville en fonction des prélèvements et du soutien d'étiage sur l'Aveyron
 - o Besoins de prélèvement dans les différents types de ressource pour chaque ilot, à l'échelle journalière
 - o Somme des besoins sur les bassins des affluents de la Lère et de l'Aveyron

Le modèle et les simulations seront présentés en juin, lors d'un atelier rassemblant les mêmes participants, en vue d'une reformulation des options de changement pour les enrichir, et d'un travail plus poussé sur les moyens d'évaluation de ces alternatives par le simulateur (critères et indicateurs d'évaluation).

Annexe 22 Conception d'alternatives territoriales pour les systèmes de culture

14 Mars 2013 – ATELIER PARTICIPATIF – Compte-rendu

Organisé et animé par Clément MURGUE, INRA UMR AGIR

Montauban, locaux de la DDT 82

1 PRESENTATIONS

1.1.22.1 Tour de table

Les noms des personnes présentes sont marqués sur post-it et localisés sur la carte (cf.

Figure 12 : Photo du poster utilisé pour situer le territoire d'étude et pendant le tour de table

Michel Blanc : DDT 82, chef service eau et biodiversité : gestion quantitative de l'eau et qualité des milieux. *A l'aval du bassin, il y a une forte pression sur le milieu, c'est problématique et il faut rassembler les acteurs pour faire émerger des solutions.*

Philippe LASSALLE : DDT 82 : gestion de la ressource en eau

Vorlette NUTTINCK : DDT 82 : gestion quantitative de l'eau

Claude CHOCHON : DDT 82 : gestion quantitative de la ressource en eau

Isabelle DECOUDUN : Chef de service ONEMA Tarn et Garonne : aspects qualitatifs et quantitatifs de l'eau. Animation des contrôles sur les restrictions sécheresse en été.

Geoffrey LAGUYER : CG Tarn et Garonne. Doit maintenir le DOE à Montauban et sur la Lère

Yannick SABRIE : Chargé de mission « Energie-Climat » à la Fédération de pêche et des milieux aquatique FDPMA82. Mise en place d'un réseau Rhéus d'observation sur le Tarn et affluents = les points rhéus.

Sophie FILHOL : chargé de mission au syndicat mixte du Pays Midi-Quercy. Il regroupe 4 communautés de communes. De St antonin jusqu'au Quercy vert au sud. Problématique énergie. Actions de sensibilisation auprès des agriculteurs et du grand public

Alexandre VANDEN ABEEL : technicien rivière à la communauté de commune Terrasses et Vallées de l'Aveyron Programme de gestion 2012 à 2016 : entretien de la ripisylve, problème de continuité des débits sur les cours d'eau. Objectifs du bon état écologique fixé par le SDAGE. Localisé sur l'ensemble du chevelu rive gauche.

Gilles GAUDARD SCHIMTER : ONEMA

Sabine MARTIN : Présidente de France Nature Environnement sur le département

Olivier THREOND : unité AGIR : chercheurs INRA, ENSAT, Purpan : élaboration d'outils de modélisation pour aider à la gestion de l'eau quantitative à l'échelle territoire. Agronomes

Delphine BURGER LEENHARDT: même unité et équipe : spatialisation des systèmes de culture à l'échelle territoire. Delphine et Olivier assurent l'encadrement de Clément

Marc MORAINÉ : INRA AGIR chargé de mission CANTOGETHER, autonomie fourragère des systèmes agricoles.

Juliette GRIMALDI : INRA AGIR, stage de fin d'études ingénieur AgroParisTech. Projet CANTOGETHER

Excusés : Thomas Lobry (CA 82), Stéphane Mathieu (CG 81),

1.1.22.2 Enoncé du programme de l'atelier

Phase 1 : présentations : objectif de l'étude, attentes des participants, introduction de la question ;

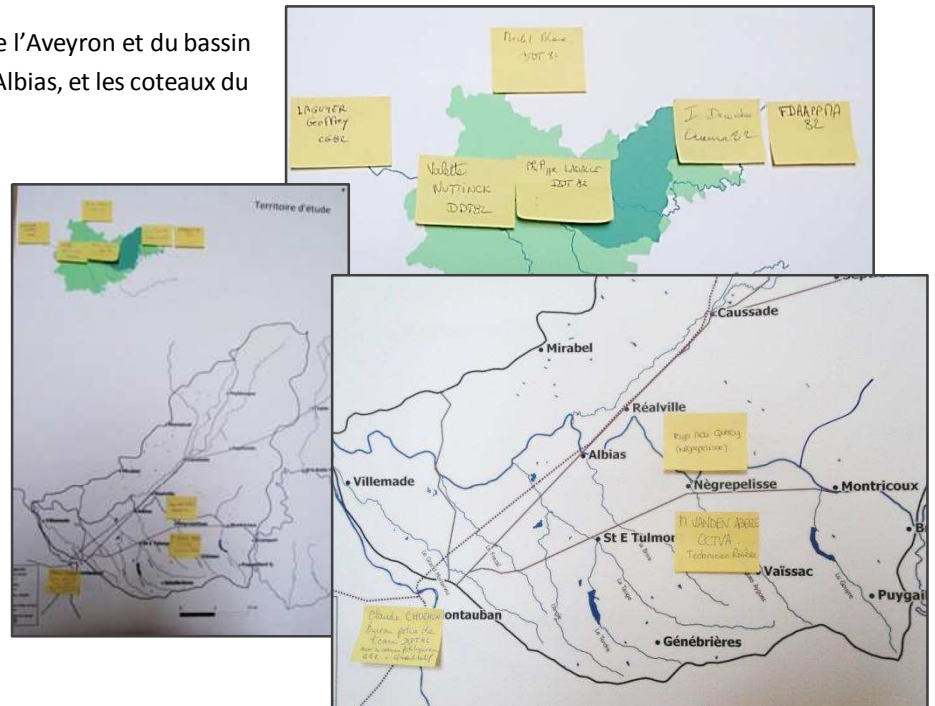
Phase 2 : élagage du sujet par un brainstorming ;

Phase 3 : précision, approfondissement du contenu des solutions élaborées.

1.1.22.3 Localisation du territoire étudié

La zone aval du bassin versant de l'Aveyron et du bassin de la Lère : autour de Caussade, Albias, et les coteaux du Quercy Vert.

Figure 16 : Photo du poster utilisé pour situer le territoire d'étude et le tour de table



1.1.22.4 Pourquoi cet atelier ?

5 slides de power point puis discussion

..1.1.a...1 Objet de la réunion

L'objet de la réunion est de réaliser un atelier de conception participative autour de la question :

Quels systèmes de culture sur le territoire pour assurer la viabilité des exploitations et favoriser la gestion des étiages ?

..1.1.a...2 Le projet de thèse

Quoi ?

L'atelier s'insère dans le cadre du travail de thèse de Clément : concevoir, modéliser et simuler des distributions spatiales de systèmes de culture en vue de leur évaluation pour lequel il est à mi-parcours, un an et demi d'accompli. Son travail consiste à :

- **Explorer les possibilités de changement** : imaginer des alternatives possibles. La position adoptée n'est pas celle de rupture avec les pratiques actuelles. Elle intègre les pratiques, les techniques, les systèmes économiques et commerciaux en place.
- **Simuler les actions, les prises de décision, dans le temps et dans l'espace** (approche fine du territoire depuis l'ilot de cultures au bassin versant). Le processus consiste à croiser l'information des bases de données avec l'avis des acteurs de terrain pour construire la modélisation.
- **Qualifier et évaluer les possibilités identifiées** : selon l'approche « variabilité climatique » des dix dernières années (plutôt que changement climatique) – carte sécheresse, carte année humide..- selon les besoins en irrigation (combien, quand et où ?), selon les conséquences sur les exploitations.

Pourquoi ?

- Car la société soulève des préoccupations environnementales : la LEMA 2006 demande aux agriculteurs de réduire leurs prélèvements pour faire face au déficit structurel. Il est devenu difficile de mettre en œuvre de retenues.
 - Car une réflexion est à mener sur la sensibilité des systèmes de culture vis-à-vis de la variabilité climatique. La recherche propose d'accompagner les agriculteurs dans cette réflexion.
 - Pour fournir des outils aux gestionnaires de l'eau permettant de gérer quantitativement l'eau. Ils permettront de simuler le comportement d'un territoire irrigué pour aider à la décision.
- > L'Etat demande aux gestionnaires et aux chercheurs chercher des solutions dans la gestion des assolements et des pratiques pour gérer la demande : pas forcément des économies mais aussi une meilleure connaissance des besoins dans le temps et l'espace.

Choix de la zone d'étude :

Il se justifie par les enjeux liés au déficit structurel de l'eau et les conflits que la problématique génère.

- La taille du territoire retenu est adaptée à ce type d'approche.
- Il a été établi en consultation avec l'Agence de l'Eau,
- ses limites sont les limites hydrographiques.
- Il a été arrêté au début des Causses pour simplifier la modélisation.
- Il présente une certaine unité des systèmes de production en place

Éléments du modèle :

- Des éléments de structure du territoire :
 - o Agricoles : la distribution spatiale des systèmes de cultures (rotations et pratiques associées) à l'échelle de l'ilot de culture
 - o Hydrologiques : les cours d'eau, les réserves et leurs connexions
 - o hydrauliques : les connexions entre les points de prélèvements et les ilots de culture
- Des éléments de dynamique pendant l'étiage
 - o La croissance des plantes dans les ilots (fonctions des pratiques)
 - o L'écoulement de l'eau dans les cours d'eau, via la variation des débits sur l'Aveyron et la Lère
- Des éléments décisionnels :
 - o tactiques des agriculteurs sur les pratiques en fonction du climat
 - o lâchers et de restriction des gestionnaires de l'eau

Programme du dispositif participatif pour 2013 :

3 sessions de conception participative sont organisées :

- Atelier 1 : construction l'alternatives : propositions de changement
 - o 13 mars : acteurs de la profession agricole
 - o 14 mars : acteurs garants du bon état des cours d'eau (macro-acteurs, gestionnaires, associations pour la protection de l'environnement)
- Atelier 2 : Qualification et évaluation des propositions (mois de Juin)
- Atelier 3 : Nouvelle session de propositions et leur évaluation (mois d'Octobre)

..1.1.a...3 Questions posées :

Quelle est la taille du territoire d'étude ?

Le territoire fait 60 000 ha = en 600 km², pour une SAU de 40 000 ha

Des travaux de recherche de ce type ont-ils déjà été menés ?

Des travaux de ce type ont été effectués sur le Bassin de la Seine mais pas à une résolution spatiale aussi fine que l'ilot de culture. En Seine, l'échelle retenue était celle de la Petite Région Agricole dans une logique de planification et de gestion de la ressource/demande. Il existe aussi des travaux faisant le focus sur un type particulier de cultures, le maïs notamment.

2 Attentes des participants

Quelles sont vos attentes vis-à-vis de la journée ?

On appose les cartons sur le tableau en les précisant.

Intitulé du carton	Précision, recadrage	Qui
Gérer au mieux les lachures	Pour assurer les besoins de l'irrigation et les besoins aquatiques ainsi que minimiser les coûts	CG
Maintien des débits pour améliorer la vie aquatique	En termes de litres par secondes	Fédé pêche
Base sensibilisation pour évolution des pratiques	Sensibiliser les acteurs globalement et spécifiquement les agriculteurs sur le déséquilibre entre ressource et demande	DDT
Connaissance précise des besoins agricoles dans le temps et l'espace	Il manque aux gestionnaires des retours venant de la profession agricole sur les besoins en eau : A quel pas de temps sont-ils nécessaires ? hebdomadaire – à quelle échelle ? : la retenue collinaire, les petits cours d'eau.	DDT
Mieux définir ambitions et visions futures	Que veut-on ? que souhaitent la société et les gestionnaires ? soit focaliser sur l'agriculture en termes de besoins en eau soit adopter une démarche globale qui intègre besoins écologiques et les besoins de la société dans son ensemble. Il est nécessaire de définir les besoins : on ne focalisera que sur les besoins quantitatifs du milieu agricole → ajout d'un carton : prendre en compte les rejets agricoles, mais ils ne seront pas modélisés.	ONEMA
Articulation ressources-besoins	Besoin de connaître l'état initial, les besoins, prendre en compte les rejets de l'agriculture (eaux résiduelles de l'irrigation). Est-il vrai qu'il n'y a pas de restitution d'eau par le milieu agricole ? Toute l'eau prélevée est-elle consommée ? (drainage) Etayer la question quantitativement. Les prendre en compte et penser à l'élaboration de meilleures pratiques d'irrigation	ONEMA, DDT
Bases pour sensibilisation pour conduire à évolution des pratiques	Nous sommes preneurs d'éléments de diagnostic du territoire, d'arguments pour mener les actions de sensibilisation	Pays de Quercy
Opérationnalité, anticipation et évaluation	Nous souhaitons un outil qui permettra de se préparer à la gestion de crise puis d'évaluer à posteriori le dispositif qui a été mis en place.	DDT
Prise de conscience de la réalité du fonctionnement des milieux naturels	Faire comprendre aux utilisateurs du territoire (ceux qui en dépendent pour leur « épanouissement ») quels sont les enjeux de durabilité du fonctionnement du milieu : l'environnement pour la durabilité de l'activité agricole	ONEMA
Evaluer les incidences des retenues collinaires	Retenues : obstacle hors cours d'eau au ruissellement naturel de l'eau mais communément utilisé pour parler de retenues. Réponse : l'étude	Communauté de communes

	n'a pas la prétention de les évaluer mais seulement de les prendre en compte. D'autres travaux INRA-Agence de l'Eau y sont dédiés.	
Identifier des débits prélevables sur les masses d'eau à un instant t	Hors cadre de l'étude Il ressort une question sur l'échelle spatiale, pourquoi penser la ressource au niveau des retenues alors que les pratiques sont affinées au niveau de l'assolement ? → pourquoi ne pas penser les prélèvements et la ressource aussi à l'échelle de l'ilot ? Le modèle permettra de faire des calculs : combien de m ³ prélevés par bassin versant, dans chaque ressource. Le modèle simule le pas de temps journalier, année après année	Communauté de communes

Groupe d'attente et réponses potentielles de l'étude

On groupe les cartons en organisant les idées qui se ressemblent..

Il se dégage 2 groupes d'attentes principaux :

- **Préciser les besoins dans le temps et l'espace vis-à-vis des ressources disponibles**, à des fins opérationnelles (optimisation des lâchers et restrictions), à une échelle hebdomadaire et sur les petits bassins versants.

Cette attente est en adéquation avec les objectifs de l'étude. On projette en effet de créer un modèle de simulation qui se base sur la situation actuelle et peut donc apporter des éléments pour une planification par les gestionnaires.

Cependant, l'échelle du petit bassin versant sera traitée non en simulant les écoulements dans ces cours d'eau (donnée non disponible) mais en estimant les besoins sur ces bassins et en confrontant cette estimation à une expertise sur la disponibilité des ressources localement. De plus, la plateforme de simulation ne prendra pas la forme d'un outil de gestion type « logiciel », utilisable directement par les gestionnaires.

- **Définir une ligne directrice pour le territoire**, en donnant des éléments pour la décision, la sensibilisation, le dialogue d'acteurs

L'étude propose justement de fournir des éléments de réflexion à l'échelle du territoire (économiques, techniques, organisationnels) pour penser des objectifs de gestion des assolements et des pratiques agricoles à des fins de gestion quantitative de l'eau. Un travail d'évaluation des alternatives simulées, approfondi en juin et octobre 2013, devrait permettre de fournir ces éléments.

Cependant, la prise de décision n'est pas un objectif de l'étude, puisqu'elle est du ressort des acteurs du territoire. La concertation des différents partis pourra prendre forme au fil de l'étude (fin 2013). Ils devraient alors avoir des éléments de qualification des alternatives qu'ils ont construits, suite aux simulations/évaluation. Il faut noter que cette étude n'a pas de positionnement environnemental ou agricole, et ne cherche donc pas à construire un « argumentaire » pour l'un ou l'autre des partis.



Figure 17 : Attentes des participants vis-à-vis de la journée de travail

La question de la restitution d'une partie des volumes prélevés pour l'irrigation pourra être traité sous ses aspects quantitatifs exclusivement, si il se dégage que ces restitutions ont un effet significatif sur la gestion des étiages.

3 BRAINSTORMING

La question suivante a été posée :

Sur le territoire,

quelles pratiques d'irrigation ou de cultures, et quels assolements,

permettraient de faciliter la gestion des étiages et assurer la viabilité des exploitations ?

1.1.22.5 Phase interactive

L'idée est de collecter l'avis des acteurs en ouvrant l'espace imaginaire. Les règles du jeu :

- *lister sur cartons les idées en vrac*
- *Sur les cartons bleus : sélectionner, 2, 3 à 4 idées principales à mettre en avant en priorité.*
- *Les cartons sont apposés sur le tableau, ordonnés en catégories, ajout de précisions.*

..1.3.a...1

..1.3.a...2 Cartons proposés et travail d'explicitation

Intitulé	Précision	Catégorie
Assolements diversifiés	6-7 cultures successives, il s'agit en fait de la rotation des cultures. Le carton est reformulé en <i>rotation</i>	Réorganiser le territoire
Fragmentation parcellaire : haie, bocage	Augmenter le nombre de cultures dans l'assolement implique une fragmentation du parcellaire donc une réflexion à mener sur la	Réorganiser le territoire

	possibilité de réintroduire du bocage qui est une solution pour reconstituer la réserve hydrique. Réfléchir à l'impact des éléments de bocage sur le rendement, quelle surface minimale pour obtenir des rendements satisfaisants ?	
Alimentation humaine directe	Mettre en place des cultures qui sont destinées à l'alimentation humaine et qui peuvent être commercialisées localement, en circuits courts. Opposition aux cultures destinées à l'alimentation animale.	Réorganiser le territoire
Favoriser les cultures peu demandeuses en eau	En termes de gouvernance, communication, carotte financière, en période estivale surtout	Réorganiser le territoire
Retenues existantes structurantes	Remplacer les petites retenues par quelques grosses : optimiser les retenues existantes, cela peut passer par de la substitution des points de prélèvements individuels directs sur le cours d'eau à des prélèvements sur réseau collectif. De plus, il s'agit de penser à l'accompagnement de l'utilisation, l'organisation des prélèvements, leur règlementation.	Optimisation par le collectif
Participation profession active	Favoriser la gestion des étiages en collectant des données sur les quantités prélevées par chacun. Favoriser la concertation, la gestion au quotidien de manière concertée entre les gestionnaires et la profession agricole.	Gouvernance Responsabilité
Co-construction	Même idée : l'avenir de l'agriculture ne peut être envisagé que s'il est co-construit avec les acteurs de l'environnement, l'industrie-agroalimentaire, les semenciers, les pêcheurs...	Gouvernance Responsabilité
Optimisation de la ressource par rapport à la surface irriguée	Tendre vers moins de surfaces irriguées de manière ciblée dans les zones où la ressource n'est pas présente : spécialiser dans l'agri irriguée dans l'aval du BV et au contraire « désirriguer sur le petit chevelu. → reformulé en « <i>désirrigation ciblée</i> »	Adéquation
Equilibre	Co-construire une organisation et la concevoir en tenant compte du potentiel des cours d'eau, de la structuration du réseau hydrographique.	Adéquation
Adéquation nouvelles cultures et filières aval	La suppression de l'irrigation conduit à initier de nouvelles cultures, celles-ci ne peuvent fonctionner que s'il existe des filières aval de valorisation structurée sur le département qui permettront la valorisation de la marchandise	Adéquation
Eau zéro	Supprimer l'irrigation : aujourd'hui l'eau du département est mal utilisée. Il faut repenser l'usage en fonction de la ressource disponible et des usages amont-aval, notion de gestion d'un bien commun à gérer collectivement → reformulation <i>bien commun, amont-aval</i>	Gouvernance Responsabilité
Economies d'eau	Techniques d'irrigation plus économes en eau, aspects techniques portant sur le matériel	Economiser
Améliorer l'efficacité des techniques d'irrigation	idem	Economiser
Techniques d'irrigation	idem	Economiser

Pratiques d'irrigation	Améliorer les pratiques pour un matériel et un système donnés (calendrier, horaires d'irrigation). Nécessité de fournir des éléments d'information technique pour assainir le débat, éviter la mésinformation et les préjugés sur les pratiques.	Economiser
Limiter les prélèvements en une certaine date	A partir d'une date (début juillet), les prélèvements ont un impact très important sur les petits cours d'eau.	Réglementaire
Calendrier des prélèvements	Fixer a priori un calendrier de prélèvement, co-construit. Faire du prévisionnel puis l'ajuster en cours de saison, de manière régulière.	Réglementaire
Agriculture communautaire sur le Bassin versant	Constituer un pot commun des bénéfices générés par les zones irriguées pour établir une solidarité avec les exploitants auxquels on a retiré l'irrigation : logique bassin-versant, amont aval. La solidarité peut être financière mais aussi pourquoi pas sous forme de parts d'eau, de fourrages ??	Sociétal
Cultures moins demandeuses en eau pendant la période estivale	Utiliser des cultures en sec.	Réorganiser le territoire
Favoriser l'élevage en tête de bassin	Par des incitations financières, par la gouvernance, par du soutien des élevages en place : garantir un autre type d'agriculture en tête de bassin car problèmes de départs de terre qui affecte l'eau. Question : dans quelle mesure favoriser ? Soutien des exploitations déjà en place ? Ajouter de nouveaux élevages ?	Réorganiser le territoire
sols	Améliorer la qualité agronomique des sols : la qualité des sols dépend de la quantité de MO, de l'utilisation des prod phytosanitaires : raisonner les pratiques pour améliorer la capacité du sol à retenir l'eau. Ex. Le BRF est une technique à envisager, 0 phyto.	Stockage dans sols
Zones humides	Importance du maintien et réhabilitation des zones humides initialement présentes sur les exploitations du fait des services environnementaux qu'elles procurent.	Stockage dans sols

..1.3.a...3 Précisions apportées par les participants sur les modalités de prélèvement et le stockage de l'eau

- Les prélèvements directs en petits cours d'eau (hors Lère et Aveyron) ont beaucoup plus d'impact que les prélèvements en plan d'eau ou en nappe, il faut les limiter (interdire).
- Les plans d'eau ont un lourd impact pendant l'étiage car ils n'ont pas de débit réservé et captent tout le ruissèlement lors des pluies, il faut surtout imposer un débit réservé au plan d'eau qui sont sur les cours d'eau, aussi petits soient-ils.
- Il faut que les irrigants prennent conscience de la limitation de la ressource : la création de nouvelles retenues n'est pas une solution envisageable, il faut plutôt optimiser les stockages existants.

1.1.22.6 Catégories d'options de changement, hiérarchisation des options

Une discussion a été menée pour grouper les options citées qui se ressemblaient. Les participants devaient tenter d'attribuer des noms de catégories à des options qui se rapprochent ou fonctionnent ensemble. Chaque personne doit placer 1 ou 2 gommettes sur le ou les grands objectifs qu'ils souhaitent prioriser.

..1.3.a...4 Présentation des options en catégories

1. Réorganiser le territoire

- Les participants ont fait ressortir une proposition qui regroupe des options d'ordre différent en les articulant autour de l'idée d'une réorganisation du territoire en vue de la gestion de l'eau.
- Cette réorganisation s'axe sur la remise cause de l'irrigation dans les zones ou les cours d'eau ne sont pas réalimentés. Il s'agit de repenser le système agricole du territoire en cherchant à localiser les cultures les moins demandeuses en eau en amont et les cultures irriguées sur la zone de terrasse où l'irrigation est la plus justifiée. Eviter/limiter les cultures irriguées en tête de bassin, en y favorisant l'élevage à l'herbe et des productions valorisables localement : changer de cultures, diversifier l'assolement. (4 gommettes).

2. Economies d'eau :

Via des techniques et pratiques plus efficaces notamment un meilleur pilotage de l'irrigation. il existe des contraintes matérielles: la gestion du matériel d'irrigation limite les possibilités d'évolution. Des mesures ont été réalisées par le CEMAGREF (IRSTEA) relativisent les pertes d'eau liées à l'irrigation en journée. (1 gommette)

3. Adéquation :

Utiliser l'eau existante et adapter l'utilisation des surfaces à la ressource disponible localement (ex. supprimer les îlots irrigués par des cours d'eau à sec et non réalimentés) (4 gommettes).

4. Réglementaire :

Proposer un calendrier des prélèvements établi avant la saison. Interdire les prélèvements directs dans les cours d'eau non réalimentés.

5. Gouvernance, responsabilisation des acteurs :

Gestion, concertation, communication : Les aspects réglementaires n'auront pas d'effet, il est nécessaire que les décisions soient prises en rapprochement entre acteurs. Ceci passe aussi par l'échange d'information. (6 gommettes)

6. « Sociétal » :

Fonctionnement communautaire : les agriculteurs qui ont accès à la ressource réalimentée « compensent » le manque à gagner de ceux qui se voient forcés d'arrêter l'irrigation. (2 gommettes)

7. Optimisation par le collectif :

Remplacer la multitude de retenues collinaires qui stoppent le ruissèlement en été par des retenues collectives « structurantes » qui peuvent stocker l'eau hivernale. (ex. rehausser le Gouyre et raccorder des nouveaux irrigants). Eviter les prélèvements directs dans les cours d'eau.

8. Améliorer le stockage eau dans les sols

Via l'utilisation de pratiques agricoles visant à l'augmentation de l'humus (TCS, bio) (2 gommettes).

- Organiser l'échange d'information (avant/pendant campagne) de manière à optimiser les lâchers en fonction des besoins sur le territoire.

4 APPROFONDISSEMENT DES OPTIONS

Sélectionner les options de changement et essayer de répondre aux questions:

- *qu'est ce qui change ? Quoi ?*
- *Dans quelles situations ? Quel endroit ? Où ?*
- *Qui est concerné ? Qui ?*

Se concentrer sur les points à prioriser.

Support : la carte + une page accolée pour prise de notes, en en-tête l'objectif à prioriser

1.1.22.7 Objectif 1 : « augmenter la quantité de cultures peu demandeuses en eau »

Ilots cibles : Maïs et maïs semence irrigués: localisation sur la carte (orange).

Veut-on diminuer toutes ces cultures ou seulement certaines ?

Diminuer en priorité celles localisées en bordure des petits cours d'eau du chevelu qui prélèvent directement dans les cours d'eau non réalimentés. (hachures dans figure 4)

Où : Deux approches méthodologiques sont envisagées par les participants pour identifier les zones d'action :

1. Localiser les cultures puis éliminer celles posant problème
2. Localiser les cours d'eau dont la situation hydrologiques est problématique puis y exclure la possibilité de culture de maïs + maïs semence

Quoi : Les remplacer par des cultures non irriguées en été : Tournesol (irrigation de printemps), lin (non irrigué, 0 phyto), blé, chanvre (pluriannuelle), maïs sec, prairie (nécessite de l'élevage).

→ Rejoint objectif 2), agroforesterie, safran (se référer à certains projets assez diversifiés portés par des jeunes agriculteurs en installation).

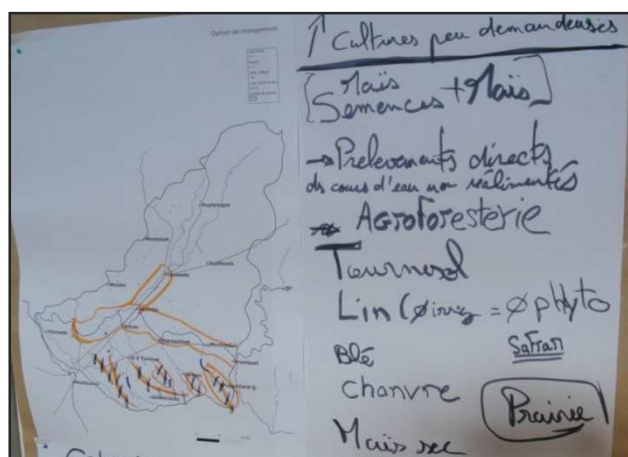


Figure 19 : Support de discussion pour l'objectif 1

1.1.22.8

1.1.22.9 Objectif 2 : Favoriser l'élevage

Localisation des territoires d'élevage (vert), positionnement sur un transect dans les zones de pente, sous les coteaux.

Se pose le problème des filières de valorisation pour la production : cibler les filières labellisées, de qualité, les circuits-courts.



Se pose le problème de la transition de métier : un céréalier peut-il devenir éleveur ? C'est un changement de compétences, de modes de conduite de l'exploitation, cela modifie la charge de travail, le matériel nécessaire.

Une solution envisageable : Produire de l'herbe pour l'élevage. On localise les prairies à côté des cours d'eau, faire du bois sur les bords de rivière avec possibilité de valorisation en biomasse notamment déjà en place au niveau du syndicat mixte du pays midi Quercy. Du peuplier est déjà implanté dans des « angles » de cultures de maïs.

Figure 20 : support de discussion pour l'objectif 2, favoriser l'élevage

1.1.22.10 Objectif 3 : construction d'un calendrier des prélèvements

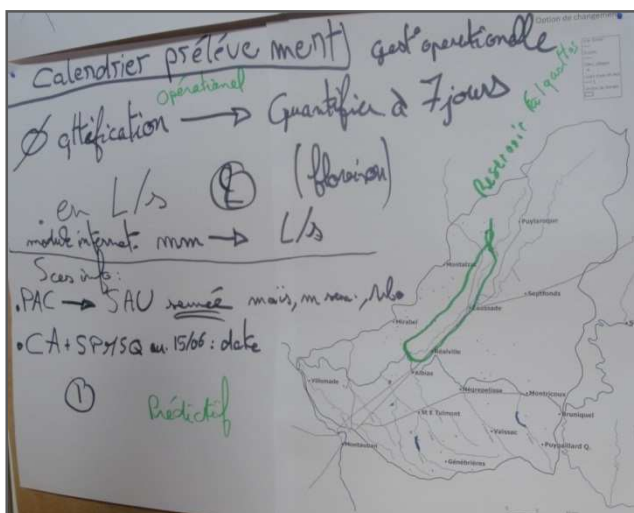
2 calendriers à envisager :

- calendrier en anticipation, prédictif
- calendrier « pour Geoffrey », opérationnel, au quotidien, qui quantifie les prélèvements. Viens répondre à la situation actuelle où il n'existe pas de quantification.

A quelles échelles de temps et d'espace ?

Hebdomadaire et par ouvrage. Donner en L/s et temps de prélèvements.

Actuellement l'info dont on dispose est les déclarations PAC disponibles au mois de Mai : SAU semée en maïs, maïs semence. → Permet la planification des besoins sur la campagne : gestion prévisionnelle.



Puis La chambre d'agriculture transmet au 15/06 les dates de semi, cela renseigne sur le stade des cultures → permet une gestion opérationnelle.

La problématique est de transcrire en L/s d'eau à lâcher les besoins de l'agriculture qui sont chiffrés en millimètres.

Quel dispositif pour le faire ? Exemple cité : système mis en place dans la Vienne : fin de semaine les agriculteurs renseignent sur une interface internet les quantités prélevées pendant la semaine et les quantités prévisionnelles qui sont prélevées dans la semaine à venir. Pourquoi pas des compteurs volumétriques ?

Figure 21 : support de discussion pour l'objectif 3

BILAN DE LA JOURNEE

Les propositions de changement retenues pour la simulation sont :

-
- Remplacer la culture de maïs par des cultures peu demandeuses dans les ilots arrosés à partir de prélèvements directs en cours d'eau non réalimentés (Bassins versants des affluents de la Lère et de l'Aveyron) ³;
- Proposer un raccordement de ces ilots et de ceux arrosés à partir de plans d'eau à des réseaux collectifs réalimentés par des prélèvements hivernaux
- Favoriser l'élevage en tête de bassin, avec l'insertion de prairies dans les zones les plus pentues ;
- Elaborer des calendriers de prélèvements pour interdire les prélèvements en cours d'eau non réalimenté dès le début d'étiage.

Le modèle étudiera l'impact de ces facteurs en évaluant leurs effets sur:

- le DOE (Débit d'Objectif d'Etiage)
- Les besoins/prélèvements effectifs sur les petits bassins versant non réalimentés (on ne peut simuler l'hydrologie car peu de données).
- La rentabilité économique des exploitations.

D'autres propositions ont été faites, qu'il n'est pas envisageable de simuler par le modèle envisagé :

- Etablir un mode de gouvernance basé sur la concertation
- Obliger un débit réservé des plans d'eau ;

Le modèle et les simulations seront présentés en juin, lors d'un atelier rassemblant les mêmes participants, en vue d'une reformulation des options de changement et d'un travail plus poussé sur les moyens d'évaluation des résultats de simulations.

Votre avis sur la façon dont se déroule les ateliers, la méthodologie employée : qu'en pensez-vous ?

--> Il faudra que les acteurs agricoles et les gestionnaires soient regroupés à un moment donné du processus. Les ateliers ont séparés les acteurs jusqu'ici.

--> Recommandation pour les futures réunions : avant la réunion faire la demande de ce que chacun attend de la réunion, les points à traiter en priorité. Cela permettra de commencer directement dans le vif du sujet, de centrer sur les points essentiels à traiter.

--> Ne pas réduire à une demi-journée, fin à 15h très bien

³ Les participants ont proposé un changement radical vers des cultures non irrigués, mais ont aussi évoqué la possibilité d'un assouplissement des rotations. Ce point rejoint une option de changement avancée par le groupe agricole le 13 Mars