



**HAL**  
open science

## Modélisation des éléments clefs d'un territoire irrigué

Delphine Burger-Leenhardt, Davide Rizzo, Olivier Therond

► **To cite this version:**

Delphine Burger-Leenhardt, Davide Rizzo, Olivier Therond. Modélisation des éléments clefs d'un territoire irrigué. [Contrat] INRA. 2016. hal-02800654

**HAL Id: hal-02800654**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02800654>**

Submitted on 5 Jun 2020

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

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

# Modélisation des éléments clefs d'un territoire irrigué

Rapport final

**Delphine Leenhardt (INRA)**  
**Davide Rizzo (INRA)**  
**Olivier Therond (INRA)**

Février 2016

Avec le soutien de l'ONEMA



Avec la contribution de



- **AUTEURS**

**Delphine LEENHARDT**, chercheur (INRA), [Delphine.Burger-Leenhardt@toulouse.inra.fr](mailto:Delphine.Burger-Leenhardt@toulouse.inra.fr)

**Davide RIZZO**, chercheur contractuel (INRA), [ridavide@gmail.com](mailto:ridavide@gmail.com)

**Olivier THEROND**, ingénieur (INRA), [Olivier.therond@toulouse.inra.fr](mailto:Olivier.therond@toulouse.inra.fr)

- **CORRESPONDANTS**

**Onema : Bénédicte AUGÉARD**, chargé de mission hydrologie quantitative (ONEMA), [benedicte.augeard@onema.fr](mailto:benedicte.augeard@onema.fr)

- **AUTRES CONTRIBUTEURS**

**Romain LARDY**, ingénieur (Arvalis-Institut du végétal), [Romain.lardy@toulouse.inra.fr](mailto:Romain.lardy@toulouse.inra.fr)

**Clément MURGUE**, ingénieur (CACG), [c.murgue@cacg.fr](mailto:c.murgue@cacg.fr)

**Droits d'usage** : accès libre

**Niveau géographique** : national

**Couverture géographique** : France

**Niveau de lecture** : professionnels, experts



Titre – Sous-titre  
Statut du document  
Auteur 1, Auteur 2



## • RESUME

Cette action vient en soutien du projet SIMULTEAU visant à développer un modèle intégré de territoire pour les Organismes Uniques de Gestion Collective (OUGC) afin de les aider à concevoir et évaluer des plans de répartition du volume prélevable pour l'irrigation et des protocoles de gestion collective en cours de campagne. Le simulateur choisi pour ce modèle de territoire est basé sur la plateforme informatique multi-agent, générique, MAELIA. Celle-ci simule à des résolutions spatiale et temporelle fines les interactions entre les activités agricoles, l'hydrologie et la gestion des ressources en eau. Elle nécessite en entrée une description du territoire à une résolution fine (de l'ordre de la parcelle cultivée). L'objectif de l'action était de développer une méthodologie de représentation des éléments des territoires qui soit générique de manière à faciliter son application sur tout territoire français. Ce rapport présente l'ensemble des méthodes qui compose cette méthodologie générique de représentation des éléments des territoires essentiels pour la gestion quantitative de l'eau : ressources en eau, sol, climat, systèmes de cultures.

La représentation spatiale des différents éléments du **système hydrologique** est facilitée par l'existence de nombreuses bases de données complémentaires, notamment celles de l'IGN (TOPO<sup>®</sup>, CARTHAGE<sup>®</sup>, ALTI<sup>®</sup>), mais celles-ci doivent faire l'objet de traitements spécifiques (ex : calculs de proximité, calculs de bassins de drainage) et, pour plus de précision, être complétées par l'expertise ou des bases de données locales. De manière similaire, pour localiser et caractériser les **sols**, nous proposons d'utiliser des sources d'information génériques (Base de Données Géographique des Sols de France (BDGSF, 1/1000 000) ou un Référentiel Régional Pédologique (RRP, 1/250 000) et, s'il y a besoin d'affiner, de recourir à des cartes de sol locales plus précises et à l'expertise locale au travers d'un atelier de cartographie participative. Concernant les **données météorologiques**, l'utilisation de données interpolées en points de grille est une technique classique. Nous avons comparé deux méthodes d'interpolation différentes SAFRAN (Météo-France, 8km x 8 km) et ClimBox (Arvalis-Institut du végétal, 2 km x 2 km). L'utilisation du climat spatialisé par ClimBox semble une meilleure alternative pour simuler l'irrigation avec notre modèle sur les zones cultivées de plaine. Pour représenter la **distribution spatiale des systèmes de culture** d'un territoire, la méthode proposée mobilise des bases de données disponibles sur la zone d'étude (Registre Parcellaire Graphique – RPG ; cartes de sols) et l'expertise locale sur les systèmes de culture selon une procédure en 5 étapes. Des entretiens d'experts locaux (1), l'établissement d'une liste de culture simplifiée et adaptée au territoire (2), et la classification des séquences de culture (3) permettent la formalisation des itinéraires techniques sous forme de règles de décision (4) et la constitution d'un « tableau des itinéraires techniques » qui permet enfin (5) l'allocation spatiale des systèmes de culture à chaque parcelle du territoire. Lier les surfaces agricoles irriguées à leurs ressources en eau reste problématique. Nous avons utilisé les informations issues du RPG 2007-2009 (surfaces irriguées) et la base de données de l'Agence de l'Eau (localisation des points de prélèvement) et procédé par analyse de la proximité spatiale.

Cette méthodologie a été évaluée de manière indirecte, en comparant, sur les unités de gestion Tarn-aval et Adour-Amont et pour la période 2003-2012, des simulations de volumes d'eau prélevés avec des données de volumes prélevés fournies par l'Agence de l'Eau. La dynamique interannuelle des prélèvements sur l'ensemble de chaque zone est bien restituée et permet de valider l'ensemble constitué par l'utilisation du module agricole de MAELIA et son implémentation grâce à la méthodologie de description du territoire proposée. Par contre les mauvais résultats obtenus lors de la comparaison des prélèvements en eau commune par commune montre la faiblesse de nos moyens pour associer surfaces irriguées et ressources en eau. Cela justifie la poursuite de l'effort pour mobiliser des données de localisation des points de prélèvements plus fiables (DDT ou OUGC) et pour fiabiliser le lien hydraulique entre surfaces irriguées et ressources en eau au travers d'un appariement de bases de données comportant des identifiants d'exploitation agricole.

## • MOTS CLES (THEMATIQUE ET GEOGRAPHIQUE)

gestion quantitative de l'eau ; sol ; météo ; système de culture ; hydrologie ; spatialisation ; bases de données ; expertise ; France, bassin Adour-Garonne, Tarn, Adour

- **MODELLING THE KEY COMPONENTS OF AN IRRIGATED TERRITORY**
- **ABSTRACT**

This action supports the SIMULTEAU project which aims at developing a territory model in order to help OUGC (French water user groups) designing and evaluating water quota distribution schemes and water management protocols. The simulator chosen for this territory model is based on the generic multi-agent computer platform MAELIA. It simulates interactions between agricultural activities, hydrology and water resources management at a fine spatial and temporal resolution. It requires as input a description of the territory at a fine resolution (of the order of the cultivated land parcel). The aim of the action was to develop a methodology as generic as possible and applicable to any French territory. This report presents the methods that compose this generic methodology for representing the components of an irrigated land essential for quantitative water management: water resources, soil, climate, cropping systems.

Representing the different components of the hydrological system is facilitated by the numerous existing and complementary French databases, including those of the National Geographic Institute (TOPO<sup>®</sup>, CARTHAGE<sup>®</sup>, ALTI<sup>®</sup>). Nevertheless, these databases should be subject to specific treatments (e.g. proximity calculations, drainage basins calculations) and, if more precision is expected, be complemented by local expertise or databases. Similarly, to characterize the soils and their spatial distribution, we propose to use generic information sources: the French Soil Database (BDGSF, 1/1000 000) or a regional soil (*Référentiel Régional Pédologique*, 1/250 000) and, if necessary, to refine it by using in addition local soil maps that are more accurate and local expertise through a participatory mapping workshop. Regarding the weather data, using interpolated data (grid points) is a classic technique. We compared two different interpolation methods: SAFRAN (Météo-France, 8km x 8km) and ClimBox (Arvalis Institute plant, 2 km x 2 km). The use of weather data interpolated by ClimBox seems a better alternative to simulate irrigation water use with our model in lowland cultivated areas. To represent the spatial distribution of cropping systems, we propose to use databases available in the study area (Land Parcel Identification System – LPIS; soil maps) and local expertise on farming systems following a 5-step procedure. Interviews with local experts (1), the establishment of a simplified list of crops adapted to the territory (2), and the classification of crop sequences (3) allow the formalization of crop management systems as decision rules (4) and the establishment of a "table of crop management systems," which finally allows (5) the spatial allocation of cropping systems to each land parcel of the study area. Linking irrigated land parcels to their water resources remains problematic. We used the information from the LPIS 2007-2009 (irrigated areas) and the Water Agency's database (location of withdrawal points) and applied an algorithm based on the proximity.

The methodology presented was evaluated indirectly by comparing, on two water management units (the downstream part of the Tarn river watershed and the upstream part of the Adour river watershed) and for the 2003-2012 period, the simulated volume of withdrawn water with water abstraction volumes provided by the Water Agency. Interannual dynamics of withdrawn volumes is well simulated when considering the whole study areas. This validates the group consisting of the use of the agricultural module MAELIA and its implementation through the methodology describing the territory proposed above. The comparison of water withdrawals, on a municipality basis, provides bad results showing the weakness of our method used to associate irrigated land parcels to their water resources. This justifies the continuation of the effort to mobilize more reliable data to locate water withdrawal points (DDT or OUGC) and to get more reliable hydraulic connection between irrigated land and water resources through the matching of databases containing farm identifiers.

- **KEY WORDS (THEMATIC AND GEOGRAPHICAL AREA)**

quantitative water management ; soil ; weather ; cropping system ; hydrology ; spatialisation ; databases; expertise; France, Adour-Garonne basin, Tarn, Adour

- **SYNTHESE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE**

### Contexte

L'application du volet sur la gestion quantitative de l'eau de la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) se traduit par l'attribution d'un *volume prélevable* pour l'irrigation à un territoire, l'*Unité de Gestion* (UG) et la désignation d'un *Organisme Unique de Gestion Collective* (OUGC) chargé de définir le règlement de répartition de ce volume prélevable entre les irrigants dans l'objectif de respecter des *Débits Objectifs d'Étiage* (DOE) aux points nodaux ou des niveaux piézométriques 4 années sur 5.

L'UMT eau «Outils et méthodes pour la gestion quantitative de l'eau, de l'exploitation agricole au territoire » (2013-2016), qui est animée par ARVALIS et l'UMR AGIR, s'est engagée dans le projet SIMULTEAU, financé par le CASDAR, pour élaborer avec des Organismes Uniques de Gestion Collective un modèle intégré de territoire afin de concevoir et d'évaluer des plans de répartition du volume prélevable pour l'irrigation et des protocoles de gestion collective en cours de campagne. Ce projet, qui mobilise presque tous les partenaires de l'UMT Eau<sup>1</sup> et deux OUGC<sup>2</sup> s'appuie notamment sur l'**architecture informatique multi-agent, générique, MAELIA**, développée par l'UMR AGIR et qui permet de représenter le fonctionnement du socio-hydrosystème correspondant aux principales situations de gestion quantitative de l'eau rencontrées en France. Cette plateforme permet entre autre de représenter les interactions entre processus écologiques (croissance des cultures et hydrologie) et processus sociaux : comportement des agriculteurs (choix d'assolement et conduite des systèmes de culture), gestion des barrages pour le soutien d'étiage, édicition des restrictions d'usage et, sous la forme d'équations économétriques (paramétriques), les autres usages (domestiques et industriels).

L'action rapportée ici a été menée au cours de l'année 2015 par l'UMR AGIR. Elle vient en soutien au projet SIMULTEAU avec pour objectif de développer des méthodes génériques permettant une représentation réaliste et adéquate, c'est-à-dire à une résolution fine (de l'ordre de la parcelle cultivée) et pour une étendue correspondant au territoire géré par l'OU, des éléments des territoires essentiels pour la gestion quantitative de l'eau : ressources en eau, sols, climat, systèmes de cultures. Le développement de telles méthodes doit faciliter l'application opérationnelle de l'outil SIMULTEAU, et de manière plus générale, la plate-forme MAELIA, sur de nouveaux territoires.

### Rappel sur MAELIA et ses besoins en données d'entrée

MAELIA est une plateforme de modélisation et de simulation, multi-agents, permettant d'évaluer, à l'échelle du territoire, les impacts environnementaux, économiques et sociaux des changements combinés de normes de gestion de l'eau, d'activités agricoles et globaux (démographie, dynamique d'occupation du sol et changements climatiques). Actuellement, cette plateforme permet de représenter à des résolutions spatiale et temporelle fines les interactions entre les activités agricoles (choix d'assolement, conduite des différents systèmes de culture au sein de chaque système de production), l'hydrologie des différentes ressources en eau (basé sur les formalismes de la plateforme SWAT®) et la gestion des ressources en eau (lâchers, restrictions, choix entre ressources). Ainsi, Maelia permet de traiter des questions concernant les interactions entre activités agricoles, dynamiques du paysage agricole et gestion des ressources naturelles à l'échelle du territoire.

Pour fonctionner, MAELIA et les outils basés dessus comme l'outil SIMULTEAU nécessitent en entrée une description du territoire relativement fine et complète relative à 3 grands sous-ensembles :

- Le système hydrologique, comprenant les cours d'eau, nappes, retenues et barrages, points de prélèvements, etc., dont les flux d'eau « naturels » entre ressources sont simulés via les formalismes du modèle SWAT® et influencés par les règles de gestion des prélèvements (agriculteurs), de déstockage des barrages (gestionnaires) ou de décisions de restrictions (police de l'eau et préfet).

---

<sup>1</sup> Arvalis-Institut du Végétal, INRA UMR AGIR, UMR CESBIO, CACG

<sup>2</sup> CA65 représentant le syndicat mixte IRRIGADOUR, Organisme Unique sur le bassin de l'Adour) et CA81, Organisme Unique sur le sous bassin du Tarn.

- Le milieu physique (sol, climat), qui détermine les processus biophysiques (croissance des plantes, débit des rivières) et consécutivement les décisions de gestion de l'eau.
- Le système agricole (systèmes de culture et de production) qui déterminent les décisions des agriculteurs et plus particulièrement leurs prélèvements en eau.

## Démarche

Dans cette étude, nous avons cherché à développer une méthodologie de représentation des éléments clés des territoires de gestion de l'eau à une résolution de l'ordre de la parcelle sur une étendue correspondant à une unité de gestion d'un OUGC qui soit aussi générique que possible de manière à être exportable sur tout UG de tout OUGC.

Notre travail s'est appuyé d'une part sur le travail antérieur conduit par Clément Murgue dans le bassin aval de l'Aveyron, au cours de sa thèse, et d'autre part sur des travaux spécifiques conduits sur deux nouveaux terrains d'étude, choisis dans le cadre du projet SIMULTEAU: les sous-bassins du Tarn-aval et de l'Adour-amont. Ces deux terrains ont en commun une situation de déséquilibre ressource-demande en eau en période d'étiage, mais ils ont par ailleurs des histoires, des types de production agricole, des types de ressource et des modes de gouvernance différents. Ils constituaient donc deux bons exemples de terrain pour développer une approche méthodologique transposable sur de nombreux bassins agricoles à enjeu de gestion d'étiage. Par ailleurs, l'un est proche de l'Aveyron aval (le Tarn aval), tandis que l'autre (Adour-amont) est plus éloigné et plus différent en termes de conditions pédo-climatiques et de systèmes de culture.

## Résultats

### Description de la méthodologie proposée

La méthodologie de représentation des éléments clés des territoires de gestion de l'eau que nous proposons peut se décliner en méthodes élémentaires à combiner pour obtenir une représentation complète et cohérente du territoire. Ces méthodes élémentaires portent sur la représentation des différents éléments du territoire, mais aussi sur l'établissement des liens qui les associent. Elles sont succinctement décrites ici et de manière plus détaillée dans les annexes associées à ce rapport.

### **Le système hydrologique**

La représentation spatiale des différents éléments du système hydrologique est facilitée par l'existence de nombreuses bases de données complémentaires, listées dans le tableau 1.

Tableau 1 : Bases de données permettant la représentation spatiale des éléments du système hydrologique.

<b>Élément à représenter</b>	<b>Bases de données source</b>	<b>Traitement particulier ou remarques</b>
Cours d'eau	BD CARTHAGE <sup>®</sup>	
Nappes	Référentiel National des masses d'eau souterraine	
Retenues collinaires	BD TOPO <sup>®</sup> + information des DDT	Traitement SIG (proximité) et informations BRGM pour distinguer les différents types de retenues (connectées ou déconnectées des cours d'eau, sur nappe d'accompagnement)
Barrages (soutien d'étiage)	BD CARTHAGE <sup>®</sup>	
Canaux	BD CARTHAGE <sup>®</sup> + OASIS (ou GESTEA)	Les bases OASIS peuvent permettre d'identifier le tracé de certains canaux absents de la BD CARTHAGE. L'information sur les flux d'eau en entrée/sortie des canaux doit être obtenue expertise locale
Réseaux sous pression (ASA)	BD locales	Cartographies existantes (obligation) mais difficilement accessibles et souvent sous format papier ; nécessité de passer par les gestionnaires de réseaux (accès soumis à leur coopération).
Bassins versants élémentaires	BD ALTI <sup>®</sup> (MNT)	Traitement SIG : calcul du bassin de drainage par segment de masse d'eau (cours d'eau d'intérêt hydrologique fournis par l'Agence de l'Eau)

## **Le milieu physique**

### *Le sol*

Pour localiser et caractériser les sols, nous avons développé une méthode basée sur l'hybridation de sources d'informations génériques (disponibles de manière généralisée sur la France) et de sources d'informations spécifiques (locales) à notre zone d'étude. Dans un premier temps, on mobilise la Base de Données Géographique des Sols de France (BDGSF, 1/1000 000) ou un Référentiel Régional Pédologique (RRP, 1/250 000) pour réaliser un découpage et un affichage des unités cartographiques de sol (UCS) calqué sur les limites du territoire. Grâce à la description quantitative des unités typologiques de sol existant au sein des UCS et au recours à des fonctions de pédo-transfert (développées par l'unité InfoSol de l'INRA Orléans), il est possible d'obtenir une première quantification des variables nécessaires à MAELIA. [Cette étape a été réalisée pour l'ensemble de la France]. Pour affiner la précision géographique, on propose dans un deuxième temps, si nécessaire de mobiliser des cartes de sol locales plus précises et l'expertise d'experts locaux au travers d'un atelier de cartographie participative.

### *Le climat*

Pour affecter des données météorologiques à tout point du territoire, l'utilisation de données interpolées en points de grille est une technique classique. Nous avons comparé deux méthodes d'interpolation différentes : (i) les données SAFRAN produites par Météo-France sur une grille de 8km x 8 km, et (ii) les données des stations Météo-France traitées par l'outil ClimBox d'Arvalis-Institut du végétal (grille de 2 km x 2 km). L'utilisation du climat spatialisé par ClimBox semble une meilleure alternative que l'utilisation de SAFRAN pour simuler l'irrigation avec notre modèle sur les zones bien couvertes par les stations météo dont les données sont utilisées par Arvalis. En revanche, pour les autres territoires, notamment les zones de montagnes (altitude > 800 m), il conviendra de rester prudent sur qualité des données climatiques et dans la mesure du possible (collaboration par exemple) utiliser/ compléter avec d'autres sources de données (par exemple, utiliser SAFRAN sur les zones d'altitude supérieure à 800m).

### **Le système agricole (systèmes de culture)**

Le système agricole du territoire est représenté au travers de la distribution spatiale des systèmes de culture en place. Un système de culture est défini au niveau d'une parcelle agricole conduite de manière homogène par la succession de cultures, chacune des cultures étant associée à un itinéraire technique. L'itinéraire technique est l'enchaînement cohérent des différentes opérations techniques (travail du sol, semis, fertilisation, irrigation, récolte). La date et les modalités des différentes opérations techniques sont fortement dépendantes du précédent cultural (donc de la succession de cultures), de la localisation de la parcelle (sol), et des conditions climatiques subies (dépendant de la localisation de la parcelle et de l'année en cours : variabilité spatiale et temporelle du climat). La modélisation des itinéraires techniques sous forme d'un ensemble de règles de décisions permet de tenir compte à la fois de la cohérence de l'itinéraire technique (liens entre opérations techniques) et de leur dépendance à un certain nombre de facteurs (sol, climat, etc.). C'est pourquoi nous proposons de représenter la distribution spatiale des successions de cultures et itinéraires techniques associés aux cultures formalisés sous forme de règles de décision.

La méthode proposée pour représenter la distribution spatiale des systèmes de culture d'un territoire a été développée dans le but de limiter les coûts de mise en oeuvre et ainsi faciliter son application sur tout territoire français. Pour cela elle mobilise des bases de données disponibles sur la zone d'étude (RPG, cartes de sols) et l'expertise locale sur les systèmes de culture selon une procédure en 5 étapes.

1. Entretiens d'experts locaux pour recueillir des informations recueillies relatives aux cultures et séquences de cultures présentes, et aux itinéraires techniques en visant l'identification des indicateurs et seuils des règles de décisions des agriculteurs. L'interaction et le recueil d'information sont facilités par l'utilisation de cartes et supports graphiques.
2. Etablissement d'une liste de culture simplifiée et adaptée au territoire
3. Classification des séquences de culture
4. Formalisation des itinéraires techniques sous forme de règles de décision. L'ensemble des itinéraires techniques est rassemblé dans un tableau figurant (i) en ligne, les indicateurs, seuils et doses du jeu de règles de décisions décrivant l'itinéraire technique et (ii) en colonne, le système de culture décrit par une combinaison [classe de culture] x [séquence type] x [sol] x [matériel d'irrigation] (Tableau des itinéraires techniques).
5. Distribution spatiale des systèmes de culture : Les parcelles du RPG étant caractérisées par leur sol (carte des sols), leur cultures et séquences de cultures (RPG) et leur caractère irrigué (RPG 2007-2009), et leur matériel d'irrigation (règles expertes), l'itinéraire technique est alloué

à chaque îlot RPG selon la combinaison [classe de culture] x [séquence type] x [sol] x [matériel d'irrigation] qui y est observée grâce au tableau des itinéraires techniques.

### ***Les liens entre système agricole et système hydrologique***

Pour associer les surfaces agricoles irriguées aux différentes ressources en eau et ainsi savoir quelle ressource en eau est impactée par chaque parcelle irriguée, nous avons utilisé les informations suivantes : (i) les surfaces irriguées ont été obtenues à partir du RPG 2007-2009 et (ii) la localisation des points de prélèvement provenait de la base de données de l'Agence de l'Eau (échelle communale). Nous avons ensuite procédé par analyse de la proximité spatiale entre PPA et parcelles irriguées, en s'appuyant sur la base des connaissances expertes locales pour déterminer des seuils de distance adéquats permettant de limiter les connexions multiples entre parcelles et PPA.

Pour améliorer la précision de la localisation de points de prélèvement, nous recommandons de recourir aux données de la base OASIS des DDT. Pour fiabiliser le lien entre surfaces irriguées et points de prélèvements, nous recommandons par ailleurs de s'assurer au préalable que les surfaces irriguées et PPA associés appartiennent à une même exploitation. L'existence d'un identifiant commun (n° SIRET/PACAGE) aux bases de données RPG et OASIS devrait permettre aux DDT de fournir une base de données liant, par exploitation, l'ensemble des îlots RPG à l'ensemble des points de prélèvements. S'il n'y a pas a priori de problème technique pour faire cet appariement de bases, des questions juridiques empêcheraient la DRAAF d'en diffuser le résultat même anonymisé. Cette méthode n'a donc pas pu être appliquée ici.

### ***Evaluation de la méthodologie***

La méthodologie présentée a été évaluée de manière indirecte, en comparant, sur les unités de gestion Tarn-aval et Adour-Amont et pour la période 2003-2012, des simulations de volumes d'eau prélevés (obtenues en utilisant une description du territoire mobilisant la méthode décrite ci-dessus) avec des données de volumes prélevés fournies par l'Agence de l'Eau.

La dynamique interannuelle des prélèvements sur l'ensemble de chaque zone est bien restituée et permet de valider l'ensemble constitué par l'utilisation du module agricole de MAELIA et son implémentation grâce à la méthodologie de description du territoire proposée ci-avant. Par contre la comparaison des prélèvements en eau commune par commune ne donne pas de bons résultats et justifie la poursuite de l'effort pour mobiliser des données de localisation des points de prélèvements plus fiables (DDT ou OUGC) et pour fiabiliser le lien hydraulique entre surfaces irriguées et ressources en eau au travers d'un appariement de bases de données comportant des identifiants d'exploitation agricole.

## **Pour en savoir plus**

### ***Article prévu***

Rizzo D., Therond O., Lardy R., Murgue C., Leenhardt D. (en préparation). How to model decision-making for crop management at the regional level? A rapid spatially explicit approach. Soumission prévue février-mars 2016 à Agricultural systems.

### ***Coordonnées des auteurs***

- Delphine Leenhardt [Delphine.Burger-Leenhardt@toulouse.inra.fr](mailto:Delphine.Burger-Leenhardt@toulouse.inra.fr)
- Davide Rizzo [ridavide@gmail.com](mailto:ridavide@gmail.com)
- Romain Lardy [Romain.lardy@toulouse.inra.fr](mailto:Romain.lardy@toulouse.inra.fr)
- Clément Murgue [c.murgue@cacg.fr](mailto:c.murgue@cacg.fr)
- Olivier Therond [Olivier.therond@toulouse.inra.fr](mailto:Olivier.therond@toulouse.inra.fr)

- **SOMMAIRE**

<b>1. Introduction .....</b>	<b>10</b>
<b>2. Rappel sur MAELIA et ses besoins en données d'entrée.....</b>	<b>10</b>
<b>3. Démarche.....</b>	<b>11</b>
<b>4. Résultats .....</b>	<b>13</b>
<b>5. Glossaire des projets et bases de données.....</b>	<b>19</b>
<b>6. Sigles &amp; Abréviations .....</b>	<b>21</b>
<b>7. Annexe 1 : Représenter le système hydrologique.....</b>	<b>22</b>
<b>8. Annexe 2 : Représenter les sols .....</b>	<b>26</b>
<b>9. Annexe 3 : Représenter la variabilité spatiale des données météo .....</b>	<b>31</b>
<b>10. Annexe 4 : Représenter le matériel d'irrigation.....</b>	<b>35</b>
<b>11. Annexe 5 : Représenter le lien entre surfaces irriguées et ressources en eau ....</b>	<b>36</b>
<b>12. Annexe 6 : Représenter les systèmes agricoles .....</b>	<b>38</b>
<b>13. Bibliographie .....</b>	<b>60</b>
<b>14. Table des illustrations .....</b>	<b>64</b>
<b>15. Remerciements .....</b>	<b>64</b>

- **MODELISATION DES ELEMENTS CLEFS D'UN TERRITOIRE IRRIGUE**

## 1. Introduction

L'application du volet sur la gestion quantitative de l'eau de la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) se traduit par l'attribution d'un *volume prélevable* pour l'irrigation à un territoire, l'*Unité de Gestion* (UG) et la désignation d'un *Organisme Unique de Gestion Collective* (OUGC) chargé de définir le règlement de répartition de ce volume prélevable entre les irrigants dans l'objectif de respecter des *Débits Objectifs d'Etiage* (DOE) aux points nodaux ou des niveaux piézométriques 4 années sur 5.

L'UMT eau «Outils et méthodes pour la gestion quantitative de l'eau, de l'exploitation agricole au territoire » (2013-2016), qui est animée par ARVALIS et l'UMR AGIR, s'est engagée dans le projet SIMULTEAU, financé par le CASDAR, pour élaborer avec des Organismes Uniques de Gestion Collective (OU) un modèle intégré de territoire afin de concevoir et d'évaluer des plans de répartition du volume prélevable pour l'irrigation et des protocoles de gestion collective en cours de campagne. Ce projet, qui mobilise presque tous les partenaires de l'UMT Eau<sup>3</sup> et deux OUGC<sup>4</sup> s'appuie notamment sur l'**architecture informatique multi-agent, générique, MAELIA**, développée par l'UMR AGIR et qui permet de représenter le fonctionnement du socio-hydrosystème correspondant aux principales situations de gestion quantitative de l'eau rencontrées en France. Cette plateforme permet entre autre de représenter les interactions entre processus écologiques (croissance des cultures et hydrologie) et processus sociaux : comportement des agriculteurs (choix d'assolement et conduite des systèmes de culture), gestion des barrages pour le soutien d'étiage, édicition des restrictions d'usage et, sous la forme d'équations économétriques (paramétriques), les autres usages (domestiques et industriels).

L'action rapportée ici a été menée au cours de l'année 2015 par l'UMR AGIR. Elle vient en soutien au projet SIMULTEAU avec pour objectif de développer des méthodes génériques permettant une représentation réaliste et adéquate, c'est-à-dire à une résolution fine (de l'ordre de la parcelle cultivée) et pour une étendue correspondant au territoire géré par l'OU, des éléments des territoires essentiels pour la gestion quantitative de l'eau : ressources en eau, sols, climat, systèmes de cultures. Le développement de telles méthodes doit faciliter l'application opérationnelle de l'outil SIMULTEAU, et de manière plus générale, la plate-forme MAELIA, sur de nouveaux territoires.

Après un premier rappel sur la plate-forme MAELIA et ses besoins en entrée et un bref aperçu de notre démarche, nous présentons dans ce rapport l'ensemble des méthodes de représentation spatiale utilisées, par groupe d'éléments du territoire. Chaque méthode est présentée de manière synthétique dans le corps du rapport et de manière plus détaillée en annexe. Le numéro de l'annexe correspondante est indiqué entre crochets au début du paragraphe détaillant une méthode ou un groupe de méthodes. Cet ensemble de méthodes constitue la méthodologie proposée. Cette méthodologie a été mise en œuvre sur deux territoires (présentés dans le paragraphe « démarche ») et évaluée. Cette évaluation fait l'objet de la dernière partie du rapport.

## 2. Rappel sur MAELIA et ses besoins en données d'entrée

MAELIA est une plateforme de modélisation et de simulation, multi-agents, permettant d'évaluer, à l'échelle du territoire, les impacts environnementaux, économiques et sociaux des changements combinés de normes de gestion de l'eau, d'activités agricoles et globaux (démographie, dynamique d'occupation du sol et changements climatiques).

Actuellement, cette plateforme permet de représenter à des résolutions spatiale et temporelle fines les interactions entre les activités agricoles (choix d'assolement, conduite des différents systèmes de culture au sein de chaque système de production), l'hydrologie des différentes ressources en eau (basé sur les formalismes de la plateforme SWAT®) et la gestion des ressources en eau (lâchers, restrictions, choix entre ressources).

---

<sup>3</sup> Arvalis-Institut du Végétal, INRA UMR AGIR, UMR CESBIO, CACG

<sup>4</sup> CA65 (OU...) et CA81 (OU...)

Plus généralement, Maelia propose une architecture logicielle pour traiter des questions concernant les interactions entre activités agricoles, dynamiques du paysage agricole et gestion des ressources naturelles à l'échelle du territoire. De manière originale, elle permet de représenter le fonctionnement et les interactions entre les 4 grands sous-systèmes d'un système socio-écologique : (i) l'écosystème, (ii) le système de ressources générées par cet écosystème, (iii) les activités des usagers de ces ressources et (iv) le système de gouvernance qui peut chercher à réguler les interactions entre usagers et ressources.

En conséquence, pour fonctionner, MAELIA et les outils basés dessus comme l'outil SIMULTEAU nécessitent en entrée une description du territoire relativement fine et complète. La figure 1 rassemble les éléments du territoire à décrire en 3 grands sous-ensembles :

- Le système hydrologique, comprenant les cours d'eau, nappes, retenues et barrages, points de prélèvements, etc., dont les flux d'eau « naturels » entre ressources sont simulés via les formalismes du modèle SWAT® et influencés par les règles de gestion des prélèvements (agriculteurs), de déstockage des barrages (gestionnaires) ou de décisions de restrictions (police de l'eau et préfet).
- Le milieu physique (sol, climat), qui détermine les processus biophysiques (croissance des plantes, débit des rivières) et consécutivement les décisions de gestion de l'eau.
- Le système agricole (systèmes de culture et de production) qui déterminent les décisions des agriculteurs et plus particulièrement leurs prélèvements en eau.

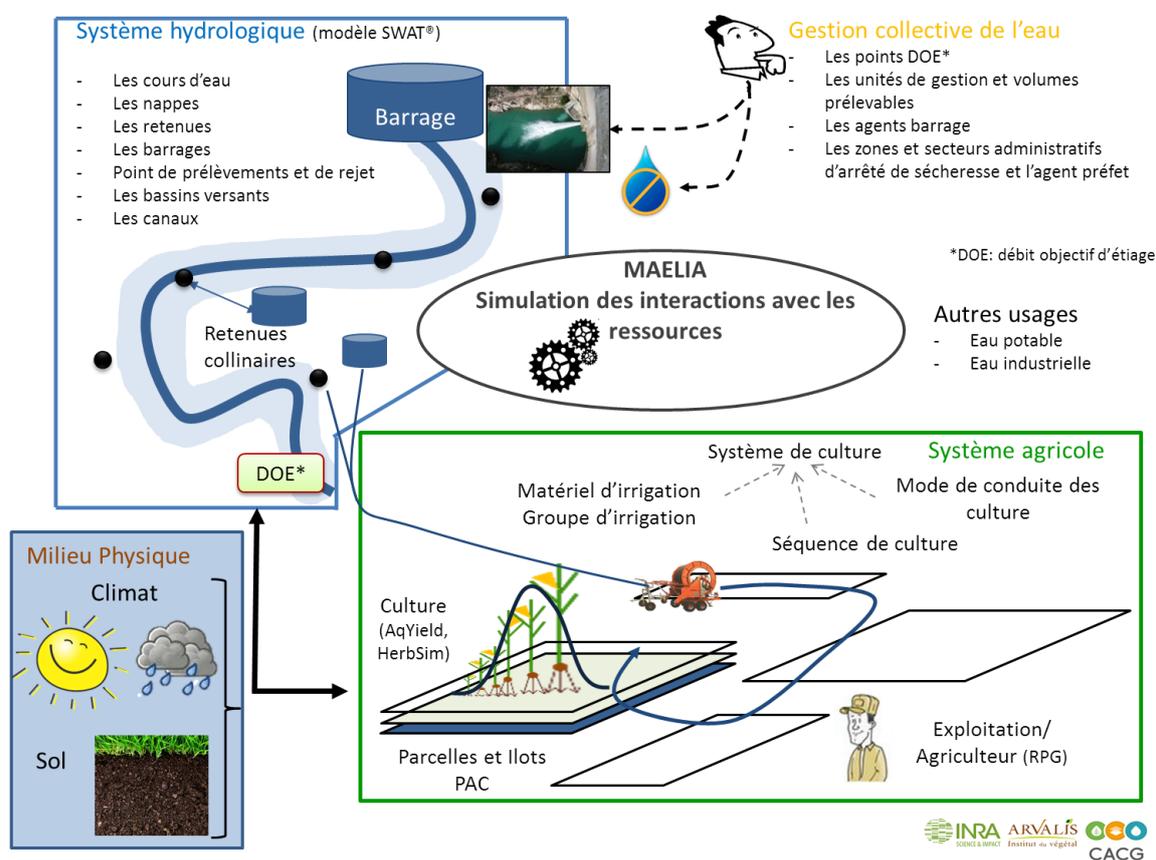


Figure 1: Présentation schématique de MAELIA. © Clément Murgue - Romain Lardy - Delphine Leenhardt – Olivier Therond

### 3. Démarche

Dans cette étude, nous avons cherché à développer une méthodologie de représentation des éléments clés des territoires de gestion de l'eau à une résolution de l'ordre de la parcelle sur une étendue correspondant à une unité de gestion d'un OUGC qui soit aussi générique que possible de manière à être exportable sur tout UG de tout OUGC.

Notre travail s'est appuyé d'une part sur le travail antérieur conduit par Clément Murgue dans le bassin aval de l'Aveyron, au cours de sa thèse, et d'autre part sur des travaux spécifiques conduits sur deux nouveaux terrains d'étude, choisis dans le cadre du projet CASDAR SIMULTEAU: les sous-

bassins du Tarn aval et de l'Adour amont. Ces deux terrains ont en commun une situation de déséquilibre ressource-demande en eau en période d'été, mais ils ont par ailleurs des histoires, des types de production agricoles, des types de ressource et des modes de gouvernance différents. Ils constituent donc deux bons exemples de terrain pour développer une approche méthodologique transposable sur de nombreux bassins agricoles à enjeu de gestion d'été. Par ailleurs, l'un est proche de l'Aveyron aval (le Tarn aval), tandis que l'autre (Adour-amont) est plus éloigné et plus différent en termes de conditions pédo-climatiques et de systèmes de culture.

La figure 2 situe ces 3 terrains au sein du bassin Adour-Garonne et le tableau 2 en présente les caractéristiques principales.

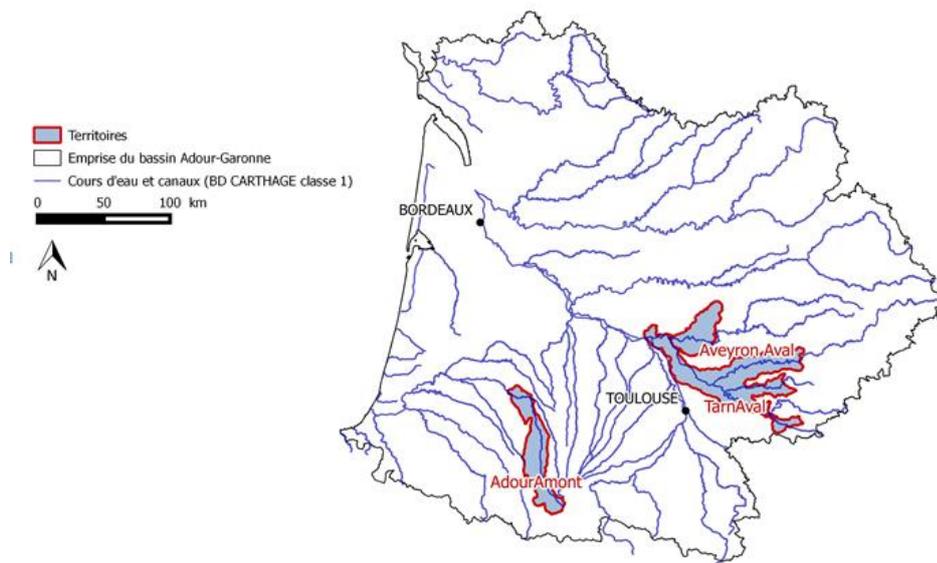


Figure 2: Situation des 3 terrains Aveyron-aval, Tarn-aval et Adour-amont au sein du bassin Adour-Garonne. © Clément Murgue

Tableau 1 : Principales caractéristiques des terrains Aveyron aval (pour rappel), Tarn aval et Adour amont.

	Aveyron	Tarn	Adour
Surface (km <sup>2</sup> )	835	2 950	1 446
SAU (ha)	38 871	160 961	79 359
SAU/surface	47%	55%	55%
SAU irrigable (ha)	15 440	44 595	30 723
Part de SAU irrigable	40%	28%	39%
Nb d'exploitations agricoles	1 144	4 184	2 671
<i>Types de sol :</i>			
• Alluvions	13%	11%	12%
• Terrasses anciennes (boulbènes)	15%	30%	29%
• Coteaux argilo-calcaires	45%	47%	58%
• Coteaux à placage détritique acide	-	12%	-
• Plateaux marno-calcaires ( <i>causses</i> )	28%	-	-

## 4. Résultats

### 4.1. Description de la méthodologie proposée

La méthodologie de représentation des éléments clés des territoires de gestion de l'eau que nous proposons peut se décliner en méthodes élémentaires à combiner pour obtenir une représentation complète et cohérente du territoire. Ces méthodes élémentaires portent sur la représentation des différents éléments du territoire, mais aussi sur l'établissement des liens qui les associent. Elles sont succinctement décrites ici et de manière plus détaillée dans les annexes associées à ce rapport.

#### 4.1.1. Le système hydrologique

[Annexe 1]

La représentation spatiale des différents éléments du système hydrologique est facilitée par l'existence de nombreuses bases de données complémentaires, listées dans le tableau 2.

Tableau 2 : Bases de données permettant la représentation spatiale des éléments du système hydrologique.

Élément à représenter	Bases de données source	Traitement particulier ou remarques
Cours d'eau	BD CARTHAGE®	
Nappes	Référentiel National des masses d'eau souterraine	
Retenues collinaires	BD TOPO® + information des DDT	Traitement SIG (proximité) et informations BRGM pour distinguer les différents types de retenues (connectées ou déconnectées des cours d'eau, sur nappe d'accompagnement)
Barrages (soutien d'étiage)	BD CARTHAGE®	
Canaux	BD CARTHAGE® + OASIS (ou GESTEA)	Les bases OASIS peuvent permettre d'identifier le tracé de certains canaux absents de la BD CARTHAGE. L'information sur les flux d'eau en entrée/sortie des canaux doit être obtenue expertise locale
Réseaux sous pression (ASA)	BD locales	Cartographies existantes (obligation) mais difficilement accessibles et souvent sous format papier ; nécessité de passer par les gestionnaires de réseaux (accès soumis à leur coopération).
Bassins versants élémentaires	BD ALTI® (MNT)	Traitement SIG : calcul du bassin de drainage par segment de masse d'eau (cours d'eau d'intérêt hydrologique fournis par l'Agence de l'Eau)

#### 4.1.2. Le milieu physique

##### 4.1.2.1. Le sol

[Annexe 2]

Pour localiser et caractériser les sols, nous avons développé une méthode basée sur l'hybridation de sources d'information génériques (disponibles de manière généralisée sur la France) et de sources d'informations spécifiques (locales) à notre zone d'étude.

Dans un premier temps, la mobilisation de bases de données telles que la Base de Données Géographique des Sols de France (BDGSF, 1/1 000 000) ou un Référentiel Régional Pédologique (RRP, 1/250 000) permet de réaliser un découpage et un affichage des unités cartographiques de sol (UCS) calqué sur les limites du territoire. Ces UCS sont décrites en termes de proportions d'UTS (unités typologiques de sol) présentes, lesquelles UTS sont décrites par une série de variables caractérisant la nature et les propriétés des sols par horizon: la texture, le régime hydrique, la charge en cailloux, le matériau originel. L'objectif étant de disposer des variables nécessaires pour le modèle (par exemple, pour MAELIA : épaisseur des horizons, profondeur d'enracinement, teneur en argile, part des éléments grossiers, teneur en matière organique, réserve utile, conductivité hydraulique à saturation, densité apparente), le recours à des fonctions de pédo-transfert (développées par l'unité InfoSol de l'INRA Orléans) est nécessaire. Cette étape aboutit à une première quantification des variables nécessaires pour le modèle de territoire, mais leur spatialisation peut nécessiter d'être affinée. [A noter que cette étape a été réalisée pour l'ensemble de la France: une spécification des variables sol nécessaires au fonctionnement de MAELIA est donc disponible pour la France entière avec comme support spatial et précision associée les UCS de la carte au 1/1 000 000].

Dans un deuxième temps, si besoin, il est possible d'affiner cette précision géographique en mobilisant (i) des cartes de sol locales de meilleure précision spatiale (mais souvent celles-ci manquent de caractérisation quantitative des sols), et (ii) l'expertise d'experts locaux au travers d'un atelier de cartographie participative. Cet atelier a pour objectif de demander aux participants (i) de valider ou re-délimiter les UCS ou unités spatiales de sol proposées par la carte locale en faisant des propositions de modification directement sur la carte ou en proposant des modifications qui font appel à des repères du territoire tels qu'une côte d'altitude ou une occupation du sol particulière révélatrice d'un sol particulier, et (ii) d'attribuer à chaque zone pédologique une UTS (dont on connaît la caractérisation quantitative).

#### 4.1.2.2. Le climat

[Annexe 3]

Pour affecter des données météorologiques à tout point du territoire, l'utilisation de données interpolées en points de grille est une technique classique. Nous avons comparé deux méthodes d'interpolation différentes:

- Les données SAFRAN produites par Météo-France sur une grille de 8km x 8 km
- Les données des stations Météo-France traitées par l'outil ClimBox d'Arvalis-Institut du végétal (grille de 2 km x 2 km). Il est possible de reconstruire des données météo sur toute la France, mais avec une meilleure précision sur les zones agricoles et de plaine où les stations météo (en particulier pour les pluviomètres) sont plus fréquentes.

L'utilisation du climat spatialisé par ClimBox semble une meilleure alternative que l'utilisation de SAFRAN pour simuler l'irrigation avec notre modèle sur les zones bien couvertes par les stations météo dont les données sont utilisées par Arvalis. En revanche, pour les autres territoires, notamment les zones de montagnes (altitude > 800 m), il conviendra de rester prudent sur qualité des données climatiques et dans la mesure du possible (collaboration par exemple) utiliser/ compléter avec d'autres sources de données (par exemple, utiliser SAFRAN sur les zones d'altitude supérieure à 800m).

#### 4.1.3. Le système agricole (systèmes de culture)

[Annexe 6]

Pour les besoins de la simulation, le système agricole du territoire peut être représenté au travers de la distribution spatiale des systèmes de culture en place. Un système de culture est défini au niveau d'une parcelle agricole conduite de manière homogène par la succession de cultures, chacune des cultures étant associée à un itinéraire technique. L'itinéraire technique est l'enchaînement cohérent des différentes opérations techniques (travail du sol, semis, fertilisation, irrigation, récolte). La date et les modalités des différentes opérations techniques sont fortement dépendantes du précédent cultural (donc de la succession de cultures), de la localisation de la parcelle (sol), et des conditions climatiques subies (dépendant de la localisation de la parcelle et de l'année en cours : variabilité spatiale et temporelle du climat). La modélisation des itinéraires techniques sous forme d'un ensemble de règles de décisions permet de tenir compte à la fois de la cohérence de l'itinéraire technique (liens entre opérations techniques) et de leur dépendance à un certain nombre de facteurs (sol, climat, etc.). C'est pourquoi nous proposons de représenter la distribution spatiale des successions de cultures et itinéraires techniques associés aux cultures formalisés sous forme de règles de décision.

La méthode proposée pour représenter la distribution spatiale des systèmes de culture d'un territoire a été développée dans le but de limiter les coûts de mise en oeuvre et ainsi faciliter son application sur tout territoire français. Pour cela elle mobilise des bases de données disponibles sur la zone d'étude

(RPG, cartes de sols) et l'expertise locale sur les systèmes de culture selon une procédure en 5 étapes.

#### 4.1.3.1. Entretiens d'experts locaux

Les experts, un pour chaque grand type de production agricole, sont désignés par une personne contact à la chambre d'agriculture locale. Leur expertise est recueillie au travers d'entretiens individuels en face-à-face (cultures principales) ou par téléphone (cultures d'importance secondaire). Les informations recueillies sont relatives aux cultures et séquences de cultures présentes, et aux itinéraires techniques en visant l'identification des indicateurs et seuils des règles de décisions des agriculteurs.

Le recueil d'information est facilité par :

- La présentation aux experts d'une carte délimitant la zone d'étude et d'une liste de cultures établie à partir du RPG, du RGA et de Corine Land Cover.
- L'adoption d'un formalisme de règles de décision pré-établi de type Si [indicateur][opérateur][seuil] Alors [action] (Bergez et al., 2001) ; il ne reste donc qu'à définir les indicateurs et seuils spécifiques à la culture étudiée dans les conditions du terrain d'étude.
- L'utilisation d'un support graphique schématisant l'itinéraire technique de la culture (l'accent étant mis sur la conduite de l'irrigation) ; ce support facilite l'expression par les experts des valeurs de seuil des règles de décision et permet à l'enquêteur de rassembler l'ensemble des informations collectées.

#### 4.1.3.2. Etablissement d'une liste de culture simplifiée et adaptée au territoire

La liste de cultures issue des bases de données est simplifiée grâce aux informations recueillies auprès des experts et en lien avec l'objectif de l'étude de manière à être facilement manipulable:

- Les cultures de faibles surfaces sont rassemblées (par exemple, les 4 types de « gel » sont rassemblées en une seule classe)
- Les cultures ayant le même usage de l'eau ou dont la conduite de l'irrigation est similaire sont également rassemblées (par exemple, légumineuses et protéagineux forment une seule classe)
- Les cultures ayant des conduites différentes sont au contraire séparées en plusieurs classes (par exemple, le maïs est séparé en 3 classes – tardif, précoce, ensilage)

#### 4.1.3.3. Classification des séquences de culture

Une typologie de séquences de cultures, pertinente vis-à-vis de la question de l'utilisation de l'eau pour l'irrigation a été établie. Elle utilise les classes de cultures définies précédemment et est basée sur la proportion de cultures au sein de la séquence. Par exemple, une séquence de culture Maïs-Maïs-Maïs-Soja-Blé-AutreCéréale appartient au type défini par la prévalence du maïs sur toutes les autres cultures de la séquence.

#### 4.1.3.4. Formalisation des itinéraires techniques sous forme de règles de décision

Les informations relatives aux indicateurs, seuils et doses (liées aux actions d'irrigation notamment) qui ont été collectées lors des entretiens à l'aide du support graphique permettent de spécifier les règles pour chaque culture. Cette étape nécessite un effort de synthèse et d'analyse critique lorsque plusieurs experts sont intervenus sur un même itinéraire technique et que leurs avis ne sont pas complètement convergents ou de même nature. Lors des entretiens, les experts ont décliné les indicateurs, seuils et doses selon les types de séquences de culture, les types de sol ou les types d'équipement d'irrigation présents s'ils estimaient ces facteurs comme responsables de variations dans l'itinéraire technique.

L'ensemble des itinéraires techniques ainsi formalisés a été rassemblé dans un tableau dans lequel figurent (i) en ligne, les indicateurs, seuils et doses du jeu de règles de décisions décrivant l'itinéraire technique et (ii) en colonne, le système de culture décrit par une combinaison [classe de culture] x [séquence type] x [sol] x [matériel d'irrigation] (Tableau des itinéraires techniques).

#### 4.1.3.5. Distribution spatiale des systèmes de culture

Les systèmes de cultures sont alloués aux différentes parcelles des îlots définis par le RPG de la

manière suivante.

Les parcelles du RPG sont d'abord caractérisées par un certain nombre d'attributs :

- La carte de sols permet d'affecter à chaque îlot RPG un type de **sol**.
- Le traitement des données RPG des années successives permet de d'identifier des « parcelles culturales » au sein des îlots RPG et d'en reconstituer la **séquence de cultures** (par application de l'algorithme développé par l'UMR AGIR décrit par Leenhardt et al., 2012) ; en remplaçant les cultures observées par les classes de culture auxquelles elles appartiennent et en utilisant un indice de similarité (Dice 1945) on peut déterminer la **séquence type** de chaque parcelle.
- Le traitement des données RPG des années 2007 à 2009 permet de déterminer les parcelles irrigables et **irriguées** : on considère que les parcelles sont irrigables dès lors que les îlots RPG auxquelles elles appartiennent ont été irrigués au moins une fois ces trois années et qu'elles sont irriguées une année donnée dès lors qu'elles sont couvertes par une culture irrigable (ex: maïs, soja, pois) cette année-là.
- Un matériel d'irrigation est enfin affecté à l'îlot RPG irrigable, soit en prenant le matériel dominant de la région (par exemple le canon enrouleur dans le sud-ouest), soit en utilisant une règle plus précise (par exemple, en affectant des pivots aux zones planes alimentées à partir de cours d'eau à hauteur du pourcentage observé de ce type de matériel, puis en affectant aux parcelles restantes des enrouleurs).

L'itinéraire technique est finalement alloué à chaque îlot RPG selon la combinaison [classe de culture] x [séquence type] x [sol] x [matériel d'irrigation] qui y est observée grâce au tableau des itinéraires techniques.

#### 4.1.4. Les liens entre système agricole et système hydrologique

[Annexe 5]

Un des enjeux du développement d'un « modèle de territoire » est d'être en mesure d'associer les surfaces agricoles irriguées aux différentes ressources en eau de manière à savoir quelle ressource en eau est impactée par chaque parcelle irriguée.

Pour pouvoir réaliser ce lien hydraulique entre surfaces irriguées et ressources en eau, il est nécessaire au préalable de disposer de la localisation des surfaces irriguées d'une part et des points de prélèvement agricole (PPA). Une fois ce préalable requis, un premier lien peut être fait en connaissant l'appartenance des surfaces irriguées et des PPA à une même exploitation, mais compte tenu du fait que les exploitations agricoles ont souvent accès à plusieurs ressources en eau, ce lien reste approximatif. Pour le préciser, il faut pouvoir associer chaque surface irriguée à une seule ressource en eau.

Actuellement l'information sur la localisation des surfaces irriguées et l'information sur la localisation des ressources en eau appartiennent à deux bases de données différentes : le RPG d'une part, et la base de données OASIS des DDT d'autre part. Dans chacune de ces bases, le lien d'appartenance aux exploitations agricoles est fait au travers d'un même identifiant : le n° SIRET/PACAGE des exploitants agricoles et préleveurs. L'appariement de ces deux bases au travers de cet identifiant permettrait d'accéder au lien approximatif entre surfaces irriguées et PPA au travers de leur appartenance à une même exploitation.

A noter toutefois, que l'information « surface irriguée » n'est disponible dans le RPG que pour les 3 années de 2007 à 2009. Par conséquent, nous devons considérer que des îlots sont irrigables dès lors qu'ils ont été irrigués au moins une fois ces trois années et qu'ils sont irrigués une année donnée dès lors qu'ils ont des cultures irrigables (ex : maïs, soja, pois) cette année-là.

Pour affiner le lien et pouvoir enfin affecter une surface irriguée à une ressource en eau unique, nous proposons de procéder par analyse de la proximité spatiale entre PPA et parcelles irriguées. Considérant un seuil de distance de connexion hydraulique, cette analyse spatiale de proximité, conduit, dans certains cas, à modéliser des connexions multiples entre parcelles et PPA. Dans cette approche, le (ou les seuils) de distance maximale de connexion hydraulique doit être déterminé sur la base des connaissances expertes locales (par ex. par le chargé irrigation de la chambre d'agriculture).

Finalement, l'établissement d'un lien hydraulique précis entre SI et PPA repose sur l'appariement entre les bases RPG (version non anonymisée) et OASIS. Ces deux bases étant à la disposition des DDT, notre proposition est que les services de l'Etat réalisent cet appariement de manière à fournir une base

de données RPG anonymisées enrichies des informations sur les PPA (géoréférencement et volumes).

Des discussions entre les membres du projet SIMULTEAU et les services de la DRAAF Midi-Pyrénées ont eu lieu récemment pour évaluer la faisabilité de ce type d'opération : s'il n'y a pas a priori de problème technique, des questions juridiques empêcheraient la DRAAF de diffuser la base de données appariée même si les données sont anonymisées.

## 4.2. Eléments de validation de la méthodologie

[Annexe 6]

Compte tenu du fait que toutes les données disponibles ont été utilisées pour décrire le territoire selon la méthodologie présentée ci-dessus, celle-ci ne pouvait être évaluée que de manière indirecte. Notre évaluation a donc consisté à comparer des simulations de volumes d'eau prélevés (obtenues en utilisant une description du territoire mobilisant la méthode décrite ci-dessus) avec des données de volumes prélevés fournies par l'Agence de l'Eau. Cette comparaison a été conduite sur deux territoires (les unités de gestion Tarn-aval et Adour-Amont) et pour les années 2003 à 2012.

*Les données de volumes prélevés « Agence »*

Les données utilisées sont issues des déclarations des préleveurs auprès des Agences de l'Eau. Elles donnent des informations sur les volumes prélevés, sur le géoréférencement des points de prélèvement agricole et sur la ressource en eau affectée par les prélèvements. Néanmoins ces informations sont entachées d'imprécisions :

- Les volumes indiqués ne sont pas exclusivement les volumes mesurés aux compteurs par les préleveurs qui les déclarent mais sont souvent, sur les années anciennes, des valeurs forfaitaires correspondant aux surfaces irriguées (ex. Adour entre 2003 et 2006).
- La localisation est rarement précisée par des coordonnées géographiques : les points de prélèvement agricole sont le plus souvent rattachés au centroïde de la commune du siège de l'exploitation.
- L'identifiant de la ressource utilisée est souvent manquant.

Néanmoins ces informations étaient les plus précises à notre disposition au moment de l'étude.

*Les simulations de volumes prélevés*

Les simulations ont été obtenues par implémentation du module agricole de MAELIA (Gaudou et al. 2013; Therond et al. 2014; <http://maelia-platform.inra.fr/>) sur les deux terrains d'étude. Ce module agricole (décrit par Murgue et al., 2014) combine un modèle biophysique simulant la croissance de la culture et le bilan hydrique du sol sur chaque parcelle (Constantin et al. 2015) et un simulateur multi-agent qui permet d'activer l'ensemble des règles de décision correspondant aux itinéraires techniques des cultures. Ce modèle utilise en entrée la carte des îlots RPG avec leurs attributs (sol, classe de culture, séquence type, règles de décisions de l'itinéraire technique) telle qu'issue de la méthodologie exposée précédemment. La période de simulation (2003-2012) a été choisie pour inclure une année extrême (2003) mais par conséquent a nécessité une reconstruction des séquences de cultures sur la période 2003-2005 pour laquelle le RPG n'existait pas. Cette reconstruction a été faite en considérant les séquences de culture observées sur 2006-2012 comme des rotations.

*La comparaison*

La comparaison entre données simulées et données "Agence" a porté sur les volumes prélevés cumulés par année et agrégés sur l'ensemble du territoire d'étude. Compte tenu du nombre très élevé de parcelles simulées (Tab. 1) et de leurs multiples interactions, notre objectif premier était de vérifier que nous étions capables de reproduire la dynamique interannuelle des prélèvements telle que décrite par les données « Agence ».

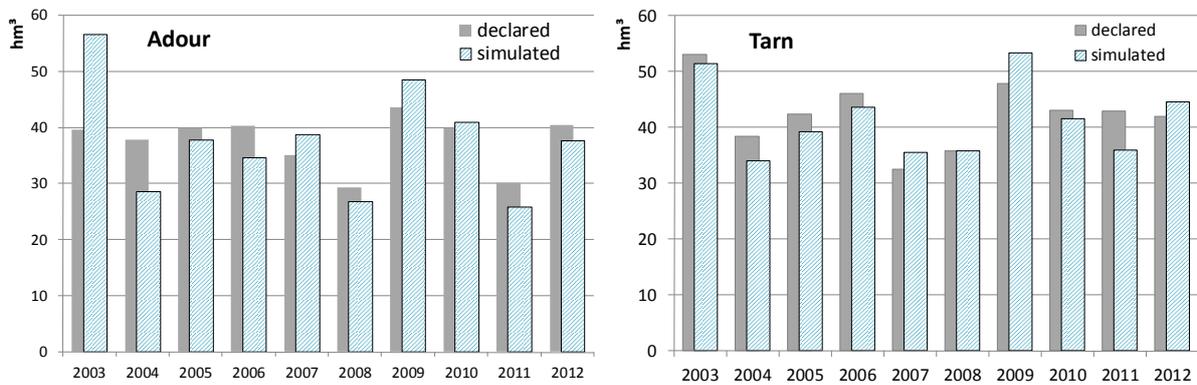


Figure 3: Comparaison des données simulées et des données «agence» (déclarées) de volumes prélevés annuels sur les deux unités de gestion étudiées (Tarn-aval et Adour-amont). © Davide Rizzo

Pour la période 2003-2012, les valeurs médianes des prélèvements annuels « Agence » sont de 39.7 hm<sup>3</sup> pour l'Adour-amont et 42.7 hm<sup>3</sup> pour le Tarn-aval, tandis que les valeurs médianes des simulations sont respectivement de 37.7 hm<sup>3</sup> et 40.4 hm<sup>3</sup>, ce qui correspond à une sous-estimation de 5% pour chaque unité de gestion. La comparaison des dynamiques interannuelles reflète cette sous-estimation. Une moins bonne adéquation entre simulations et données « agence » apparaît en début de période. Cela peut aisément s'expliquer par, d'une part, le fait que les cultures de 2003 à 2005 ont été déduites des séquences de de cultures observées en 2006-2012 et non issues directement du RPG et, d'autre part, pour l'Adour-amont, par l'imprécision des données « Agence » largement forfaitaires à ce moment-là. L'année 2011 est particulièrement mal simulée, pour des raisons que nous n'expliquons pas : il semble que lors de cette année pluvieuse en été, les agriculteurs ont continué à irriguer.

Malgré ces différences, la dynamique interannuelle est bien restituée et permet de valider l'ensemble constitué par l'utilisation du module agricole de MAELIA et son implémentation grâce à la méthodologie de description du territoire proposée ci-avant.

Une deuxième comparaison a consisté à comparer les prélèvements en eau commune par commune. Cette comparaison ne donne pas de bons résultats (non présentés ici). Cela s'explique par la mauvaise localisation des points de prélèvements agricoles : cette mauvaise localisation affecte d'une part les données utilisées pour l'évaluation, mais aussi la fiabilité du lien hydraulique entre surfaces irriguées et ressources en eau. Ces mauvais résultats justifient la poursuite de l'effort pour mobiliser des données de localisation des points de prélèvements plus fiables (DDT ou OUGC) et pour fiabiliser le lien hydraulique entre surfaces irriguées et ressources en eau au travers d'un appariement de bases de données comportant des identifiants d'exploitation agricole (cf. 4.1.4).

## 5. Glossaire des projets et bases de données

ALTI<sup>®</sup> : La BD ALTI<sup>®</sup> est le modèle numérique de terrain (MNT) maillé qui décrit le relief du territoire français à moyenne échelle. <http://professionnels.ign.fr/bdalti>

BDGSF : Base de Données Géographique des Sols de France au 1/106. Contact BDGSF : Bertrand Laroche [bertrand.laroche@orleans.inra.fr](mailto:bertrand.laroche@orleans.inra.fr)

BNPE : Banque Nationale des Prélèvements en Eau (<http://www.reseau.eaufrance.fr/ressource/sfg-bnpe-0>)

CARTHAGE<sup>®</sup> : La BD CARTHAGE<sup>®</sup> est la base de données complète du réseau hydrographique français. Elle est téléchargeable gratuitement, et son utilisation est régie par des conditions spécifiques définies par le Sandre. <http://professionnels.ign.fr/bdcarthage>

ClimBox: outil d'Arvalis-institut du végétal qui extrapole spatialement le climat en tous points à partir des données de stations météo en utilisant des régressions linéaires, quadratique et des krigeages. (Le Bris, 2008).

Corine Land Cover: base de données européenne d'occupation biophysique des sols <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/clc/carte/metropole>

GESTE A : Le logiciel SIRCA-GESTE A permettra la gestion des données des Organismes Uniques de Gestion Collective de l'eau (volumes attribués, volumes prélevés...). Il donnera la possibilité aux gestionnaires et aux agriculteurs de renseigner les informations demandées et de les traiter

MAELIA : Multi-Agents for Environmental norms Impact Assessment : plateforme de modélisation et de simulation, multi-agents, représentant à des résolutions spatiale et temporelle fines les interactions entre les activités agricoles (choix d'assolement, conduite des différents systèmes de culture au sein de chaque système de production), l'hydrologie des différentes ressources en eau (basé sur les formalismes de la plateforme SWAT<sup>®</sup>) et la gestion des ressources en eau (lâchers, restrictions, choix entre ressources). (<http://maelia-platform.inra.fr/>)

RG A : Recensement Général Agricole ; <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/recensement-agricole-2010/>

RPG : Registre Parcellaire Graphique: base de donnée des zones de cultures déclarées par les exploitants, gérée par Agence de Services et de Paiements

RRP : Référentiel Régional Pédologique ; base de données géographique régionale sur les sols ; [http://www.gissol.fr/fiches\\_pdf/Fiches\\_RRP\\_2014.pdf](http://www.gissol.fr/fiches_pdf/Fiches_RRP_2014.pdf)

SAFRAN : Système d'analyse fournissant des renseignements atmosphériques à la neige ; c'est un système d'analyse à mésoéchelle de variables atmosphériques près de la surface. Il utilise des observations de surface, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques pour produire les paramètres horaires nécessaires au fonctionnement d'ISBA au pas de temps horaire. Ces paramètres (température, humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident), sont analysés par pas de 300m d'altitude. Ils sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km).

SIMULTEAU : projet financé (2015-2018) par le CASDAR et piloté par Arvalis-Institut du végétal ayant pour but de mettre au point avec les Organismes Uniques de Gestion Collective partenaires (des chambres d'agriculture), un outil d'aide à la conception et l'évaluation (i) de plans de répartition annuelle ou pluriannuelle du volume prélevable et (ii) de protocoles de gestion collective des ressources en eau permettant, en cours de campagne, de réduire les risques de non-respect des débits ou hauteurs de nappe réglementaires.

SWAT<sup>®</sup> : "Soil and Water Assessment Tool", modèle hydrologique physique semidistribué <http://swat.tamu.edu/>

TOPO<sup>®</sup> : La BD TOPO<sup>®</sup> est une description vectorielle 3D (structurée en objets) des éléments du territoire et de ses infrastructures de précision métrique. <http://professionnels.ign.fr/bdtopo>



## 6. Sigles & Abréviations

AE : Agences de l'Eau

ASA : Associations Syndicales Autorisées

BD ou BDD: base de données

BRGM : Bureau de Recherches Géologiques et Minières

CACG: Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne

CESBIO: Centre d'Etudes sSpatiales de la BIOSphère

DDT : Directions Départementales des Territoires

DOE : Débits Objectifs d'Etiage

DRAAF : Direction Régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt

ETP : Evapotranspiration potentielle

ICPE : Installations Classées pour la Protection de l'Environnement

INRA : Institut National de la Recherche Agronomique

LEMA : Loi sur l'Eau et les milieux Aquatiques

MNT : Modèle Numérique de Terrain

OU ou OUGC : Organisme Unique de Gestion Collective

PACAGE : identifiant des exploitants agricoles et préleveurs

PPA : points de prélèvement agricole

RGA : Recensement Général Agricole

RPG : Registre Parcellaire Graphique

SANDRE : Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau

SAU : Surface Agricole Utile

SIG : Sytème d'Informations Géographique

SIRET : identifiant des exploitants agricoles et préleveurs

SMDEA : Syndicat Mixte Départemental de l'Eau et de l'Assainissement

UCS : unités cartographiques de sol

UG :Unité de Gestion

UMR : Unité Mixte de Recherche

UMT : Unité Mixte Technologique

UTS : unités typologiques de sol

ZH : zone hydrologique

## 7. Annexe 1 : Représenter le système hydrologique

Pour représenter l'hydrologie sur le territoire (éléments du cadre bleu dans la Figure 1), il faut à la fois tenir compte des éléments importants en termes de volumes et/ou de débits (par exemple, les nappes, les cours d'eau) mais également des éléments (par exemple, retenues collinaires), gérés par l'Homme, ayant un rôle significatif sur la dynamique, et en particulier sur les périodes d'étiage. Les éléments devant nécessairement être considérés sont donc les suivants :

### 1. Les cours d'eau.

Cette information est issue de la BD CARTHAGE®. Parmi tous les cours d'eau de la base, l'Agence de l'Eau Adour-Garonne a sélectionné un sous-ensemble considéré comme ayant un intérêt hydrologique. Ils sont appelés segments de masses d'eau.

### 2. Les bassins versants élémentaires.

Nous les avons construits par traitement SIG (calcul de bassin de drainage) à partir du modèle numérique de terrain MNT (BD ALTI®), en construisant un bassin versant élémentaire par segment de masse d'eau (cours d'eau d'intérêt hydrologique fournis par l'Agence de l'eau).

### 3. Les nappes.

L'information géographique de la nappe d'accompagnement a été fournie par le BRGM. Dans les territoires considérés, les prélèvements en nappe profonde sont négligeables, aussi la modélisation représente tous les prélèvements en nappe comme des prélèvements en nappes d'accompagnement.

### 4. Les retenues collinaires.

Nous sommes partis des informations de la BD TOPO®, enrichis des informations fournies par certaines DDT. Sur cette base de données, un travail a été mené afin d'estimer le bassin de ruissellement (élément nécessaire pour la modélisation de la dynamique de recharge de la retenue), le volume de la retenue et son usage ou non pour l'agriculture. La modélisation de la recharge s'appuie en partie sur le modèle SWAT®. Nous avons modélisé leur recharge en distinguant :

- Les retenues déconnectées du cours d'eau
- Les retenues sur nappes d'accompagnement (zonage fourni par le BRGM). Elles sont modélisées comme étant principalement rechargées par les aquifères peu profonds.
- Les retenues connectées au cours d'eau principal (i.e. segment de masse d'eau)
- Les retenues connectées aux cours d'eau secondaires

### 5. Les barrages pour le soutien d'étiage.

Leur localisation est fournie par la BD CARTHAGE®. Nous avons modélisé leur comportement par un ensemble de règles de décision, tenant compte du débit manquant et d'une prévision des besoins et d'une gestion de priorité entre barrages. Les volumes caractéristiques des barrages et les paramètres permettant de reproduire les stratégies de gestion de barrage ont été construits à dire d'expert.

### 6. Les infrastructures hydrauliques

Voir paragraphe ci-dessous, et Annexe 5 en complément

## Le cas des infrastructures hydrauliques

Les infrastructures hydrauliques liées à l'irrigation doivent être représentés dans les modèles de territoire pour la gestion de l'eau car elles jouent un rôle majeur dans l'hydrologie, en permettant le

déplacement de volumes d'eau d'une zone à une autre, de manière continue ou intermittente.

On peut distinguer d'une part les **réseaux de canalisation gravitaires** et les **réseaux sous pression**. Les réseaux de canalisation gravitaires sont communément appelés canaux mais ne sont pas toujours bétonnés, ils prennent souvent la forme de rigoles en terre et sont végétalisés. Ils sont souvent issus de travaux anciens et ont été ou sont toujours multifonction (ex. minoterie). Les réseaux sous pression pour l'irrigation sont constitués de canalisations enterrées qui distribuent l'eau près des parcelles irriguées. Ils sont en majorité gérés par des Associations Syndicales Autorisées (ASAs).

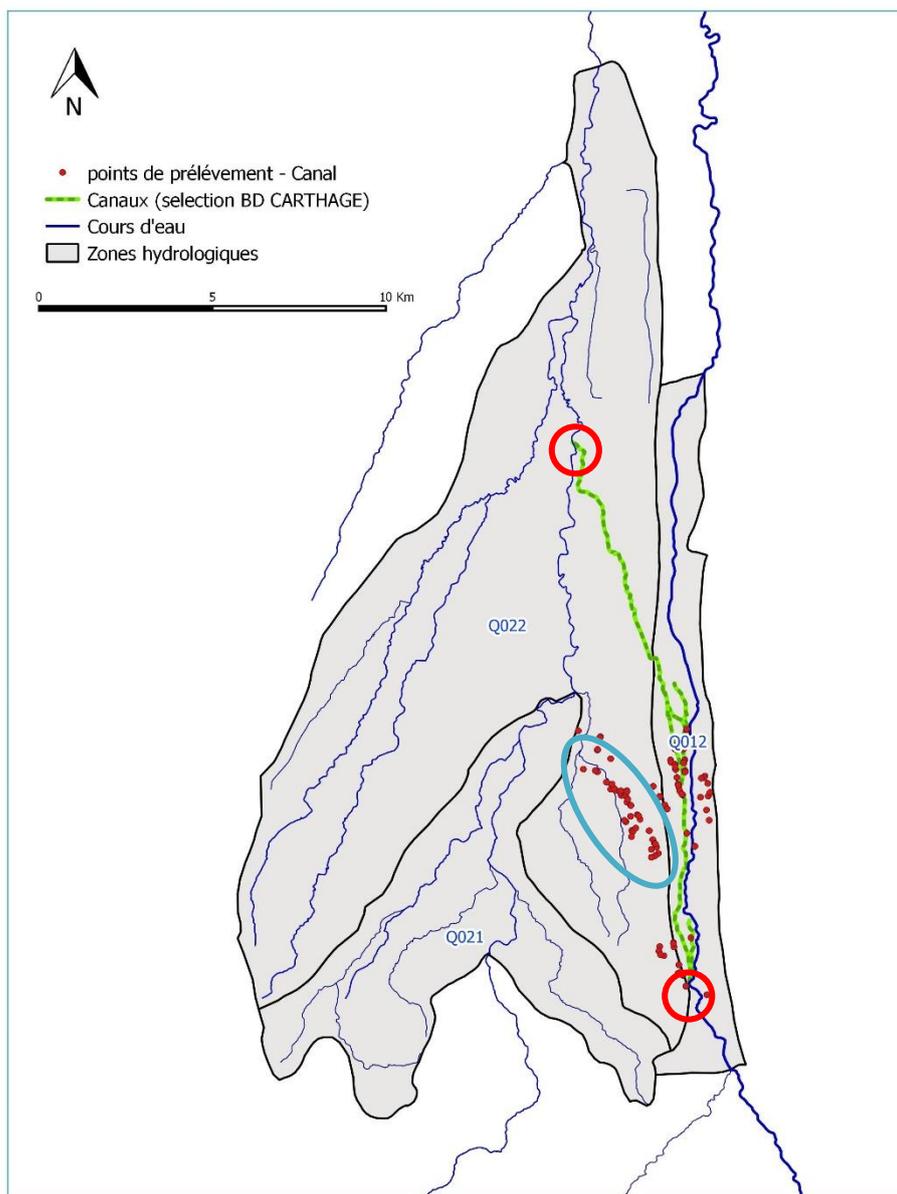
Certains territoires sont plus influencés par les ouvrages hydrauliques que d'autres. Les territoires où l'irrigation est historiquement abondante sont le plus souvent très influencés et il est alors indispensable d'avoir une représentation spatiale des infrastructures hydrauliques et un paramétrage de leur fonctionnement en termes de transferts d'eau. Nous notons que si la cartographie des ouvrages est toujours disponible sur cartes papiers et parfois sous forme de base de données informatiques, il existe très peu d'information sur les flux d'eau et leur distribution dans les territoires.

## Canaux

La cartographie des canaux est difficile. Les canaux primaires et secondaires sont le plus souvent disponibles dans les bases de données sur l'eau, dont la BD CARTHAGE® (couche des tronçons hydrauliques), mais les plus petites infrastructures en sont absentes. D'autre part, il existe très peu d'information sur les débits circulants dans les canalisations.

Nous proposons une représentation des canaux qui permette une modélisation de l'hydrologie semi-distribuée qui est adoptée par la plupart des modèles hydrologiques dont SWAT. Ce type de modélisation utilise un référentiel hydrologique de type bassin versant élémentaire (ici nous utilisons les zones hydrologiques de la BD CARTHAGE® ou ZH). L'approche de représentation des canaux que nous proposons a pour objectif de représenter les flux d'eau d'une zone vers une autre via les canaux. Elle croise plusieurs sources d'information, à savoir la BD CARTHAGE®, l'expertise et une base de données locale sur les points de prélèvement :

1. la BD CARTHAGE® est utilisée pour identifier les principales prises d'eau et principaux points de rejets depuis et vers les cours d'eau. Dans la carte ci-dessous (Fig. 1), on peut repérer que le canal prélève de l'eau à l'amont de la ZH Q012 et en restitue ensuite au cœur de la ZH Q022 (cercles rouges).
2. l'expertise locale est mobilisée pour estimer les flux d'eau en entrée/sortie du canal, du fait de l'absence de bases de données de mesures dans la plupart des situations..
3. une BDD contenant des informations sur les points de prélèvements agricoles, telle que OASIS (base de donnée des DDT) ou la future base GESTEA des Organismes Uniques, doit permettre de localiser les points de prélèvements dans le / les canaux non identifiables par la BD CARTHAGE (cercle bleu ci-dessous) sur la base de leurs toponymes (ex. « canal d'Alaric »). La localisation des points de prélèvement en canaux permet d'associer ces prélèvements à une ZH. Ainsi, dans la figure ci-dessous, les points cerclés de bleu correspondent à des prélèvements sur un canal dérivé de celui issu de la BDD. Bien que ces points cerclés de bleu ne soient pas positionnés sur le tracé du canal issu de la BDD, leurs prélèvements devront aussi être soustraits au flux issu de la ZH Q012 et reversé dans la zone Q022.



Sources : BD CARTHAGE, IRRIGADOUR  
 Réalisation : CAGG C. Murgue - Jan 2016  
 Projection : RSF - Lambert 93

Figure 4 : Exemple de cartographie des canaux en croisant la BD CARTHAGE® et les BDD sur les points de prélèvements  
 © Clément Murgue

## Réseaux sous pression (ASAs)

La cartographie des réseaux sous pression doit permettre de lier les surfaces irriguées aux milieux de prélèvement, via ces réseaux, par simple recoupement spatial.

La cartographie des réseaux sous pression est aujourd'hui exhaustive suite à la Loi «numérisation», qui requiert que tout réseau enterré soit cartographié. Cependant, l'accès à cette information reste très difficile hors contexte de travaux publics à proximité de réseaux ([www.dictservices.fr/](http://www.dictservices.fr/)).

Outre cette difficulté d'accès, nous notons dans de nombreux cas d'ASA l'inexistence de données informatiques et donc la nécessité de se référer à des cartes papier disponibles directement chez les gestionnaires, et dans certains cas auprès des collectivités locales ou de certaines DDT. Là encore, ces entités pourront refuser de mettre l'information à disposition.

Concernant l'estimation des flux de transfert d'eau associés à ces réseaux, nous proposons deux approches selon les situations :

- Territoires comportant un petit nombre de réseau sous pression

Dans ce cas, on pourra consulter les gestionnaires des réseaux pour obtenir une information sur les dynamiques de débit de pompage

- Territoires avec de nombreux réseaux sous-pression

Dans ce cas il sera impossible de recenser chaque réseau. Nous proposons donc d'estimer les débits de prélèvement à partir des pratiques d'irrigation sur les parcelles connectées aux réseaux, en cumulant les débits de chantier tout en tenant compte du rendement hydraulique du réseau dû aux fuites dans les canalisations (généralement de l'ordre de 90%).

Nous notons cependant que dans certaines situations se développe le suivi dynamique des prélèvements (localisation et intensité) pour les besoins des gestionnaires d'ouvrage de soutien d'étiage (ex. barrage de Montbel, SMDEA, et du système Neste, CACG). Dans ces situations, l'information est disponible pour chaque point de prélèvement, donc pour les stations de pompage de réseau sous pression, et avec une fréquence et une précision variable. Certaines technologies permettent un suivi horaire des dynamiques de prélèvements sur les stations de pompage réseau.

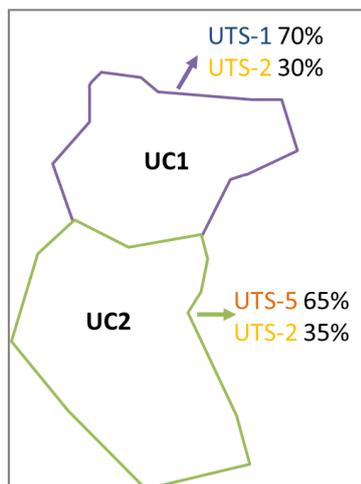
## 8. Annexe 2 : Représenter les sols

La représentation des sols est cruciale pour le développement d'un modèle de territoire de gestion de l'eau parce qu'elle permet de modéliser (1) les processus hydrologiques sur les bassins versants élémentaires (ex. ruissellement, infiltration), mais aussi (2) les interactions entre les cultures et la réserve hydrique des parcelles agricoles. Elle peut se baser sur une ou plusieurs des sources d'information suivantes : bases de données pédologiques, cartes des sols, connaissances locales.

### Les informations disponibles

#### Les bases de données pédologiques : une information générique

Les bases de données (BDD) pédologiques sont des modèles de la diversité spatiale de la couverture de sol. Elles sont développées à partir de la méthodologie proposée par la FAO en 1974 pour différencier et nommer les principaux types de sol, revue et adaptée pour prendre en compte les spécificités des paysages français. Elles se basent sur la distinction des processus pédologiques responsables de la différenciation des sols (brunification, lessivage, podzolisation, hydromorphie).



Elles proposent une représentation spatialement explicite des sols, via les Unités Cartographiques de Sols (UCS), qui correspondent à des grands ensembles morpho-paysagers. Elles proposent aussi une description quantitative et qualitative de types de sol (ou Unités Typologiques de Sol - UTS). Chaque UTS regroupe des sols provenant d'une même roche-mère, situés dans une même situation géomorphologique, présentant une même succession d'horizons de nature et d'épaisseur comparables (ex: mêmes textures, pierrosités, structures, signes d'hydromorphie, etc.).

Les UTS sont décrites par une série de variables caractérisant pour chaque horizon la nature et les propriétés des sols, en surface comme en profondeur : la texture, le régime hydrique, la charge en cailloux, le matériau originel. Aucune information n'est disponible sur la localisation de chaque UTS, mais on connaît la part relative de chaque UTS dans l'UCS.

Figure 5 : Schéma de la Représentation des Unités Cartographiques des Sols et des Unités Typologiques de Sol dans la BDGSF © Clément Murgue

En France, on peut mobiliser la Base de Données Géographique des Sols de France (BDGSF) au 1/10<sup>6</sup> et les Référentiels Régionaux Pédologiques (RRP) au 1/250 000 disponibles sur certaines régions/zones. Les BDD pédologiques représentent une source d'information riche, brute, qui a déjà été mobilisée dans divers projets pour aboutir notamment à des cartes de sols à des niveaux locaux et régionaux.

#### La BDGSF, Base de Données Géographique des Sols de France

La base de Données Géographique des Sols de France (BDGSF) est mise à disposition par l'unité Infosol de l'INRA Orléans. Elle correspond à la partie française de la base européenne (SGDBE). La BDGSF propose des UCS géo-référencées et permet ainsi de produire une représentation cartographique de l'ordre du 1/10<sup>6</sup>. Elle est donc bien adaptée pour représenter la pédologie de grands territoires, typiquement le bassin hydrographique d'un fleuve, mais nécessitera des adaptations pour des territoires de moindre étendue.

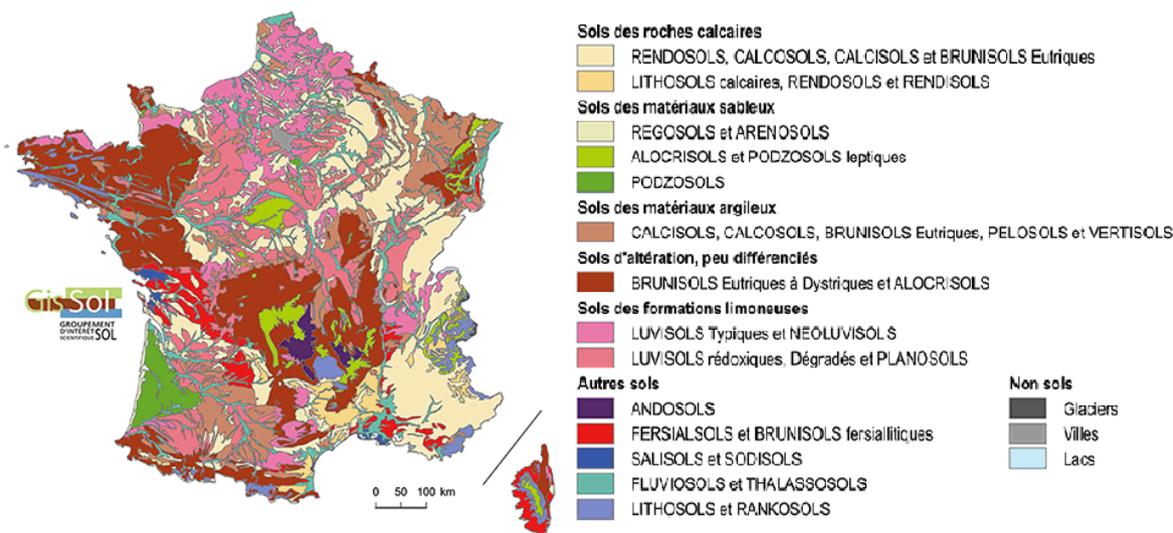


Figure 5 : Base de Données Géographique des Sols de France au 1/10<sup>6</sup>. Contact BDGSF : Bertrand Laroche  
[BERTRAND.LAROCHE@ORLEANS.INRA.FR](mailto:BERTRAND.LAROCHE@ORLEANS.INRA.FR)

### Les BDD du Référentiel Régional Pédologique (RRP)

Les BDD du "Référentiel Régional Pédologique" (RRP) sont des BDD géographiques régionales dont la précision permet une représentation cartographique au 1/250 000ème. Elles sont issues du programme IGCS (Inventaire, Gestion et Conservation des Sols) mais ne sont pas disponibles de manière uniforme sur l'ensemble du territoire français malgré l'objectif d'obtenir une carte harmonisée sur l'ensemble du territoire à l'horizon 2016. Par exemple, la diffusion de la donnée sur la région Midi-Pyrénées n'est pas possible.

*Encadré 1 : Limites des BDD pédologiques BDGSF et RRP pour leur utilisation dans un modèle de territoire pour la gestion quantitative de l'eau.*

#### 1. La spatialisation partielle de l'information

L'information est disponible par UTS et donc n'est pas spatialisée. Pour proposer une représentation spatialement explicite de la couverture des sols sur un territoire (ex. carte des réserves utiles), il faudra donc développer des approches de spatialisation des UTS. Nous distinguons deux approches à choisir selon les moyens disponibles :

- Considérer l'UTS dominant ; approche simple mais qui convient dans le cas de territoires avec une UTS largement dominante, ou lorsque les usages des sols ne sont pas / peu diversifiés.
- Attribution des UTS à des usages du sol spatialisés ; approche nécessitant de développer des logiques de spatialisation plus ou moins complexes (cf. Encadré 2).

#### 2. La nécessité de calculer des variables quantitatives

Les BDD proposent une information brute qu'il faudra traiter pour qu'elle soit utile au modèle de territoire. Dans le cas de modèles de territoire intégrant des modules de simulation agronomiques ou hydrologiques (de plus en plus communs), il pourra être nécessaire de mobiliser des fonctions de pédo-transfert pour accéder à des variables intégratives (ex. conductivité hydraulique, réserve utile) et de manipuler l'information pour qu'elle corresponde au format de la donnée en entrée des modules (ex. passer d'horizons superposés à des horizons emboîtés).

### Les cartes de sol : une information spécifique

Des cartes de sols préexistantes sont disponibles sur la plupart des territoires. Elles sont d'une très grande diversité, tant en termes de thématique que de précision spatiale, car issues de divers projets. Souvent, elles sont au format papier, ce qui limite grandement leur utilisation dans les modèles de territoire basés sur une structure informatique (SIG ou modèles de simulation). Les cartes de sols disponibles sous forme de couches géo-référencées sont souvent issues d'un traitement de la BDGSF ou de RRP ou d'une numérisation de carte au format papier.

Souvent, les cartes de sols répondent à une thématique pour un territoire donné, et donnent ainsi une représentation spatiale fine (jusqu'à 1/50 000) mais spécifique d'une problématique. Cette spécificité fait leur force et leur faiblesse pour la modélisation d'un territoire de gestion de l'eau :

- les délimitations sont souvent administratives alors que les modèles sont de plus en plus communément de cohérence hydrologique.
- elles ne représentent qu'une seule variable d'intérêt (ex. la réserve utile) ou qu'une typologie qualitative de sols sans en donner les caractéristiques.

Dans une approche d'hybridation de l'information, les cartes pédologiques précises peuvent permettre de définir ou redéfinir les contours d'unités typologiques de sols (UTS) quantifiées ou qualifiées par ailleurs.

### *La connaissance locale*

La connaissance d'experts et d'acteurs locaux sur les sols peut contribuer à une représentation fine et adaptée de la pédologie d'un territoire. Seule, elle est très limitée pour modéliser les types pédologiques et leur répartition spatiale car elle ne permet pas de produire des délimitations géographiques explicites ou des quantifications de variables descriptives précises. Cependant, elle est une source d'information riche, voire incontournable pour de petits territoires, car :

- elle permet de valider et compléter les bases de données ou cartes de sol ;
- elle facilite l'acceptation du modèle en incluant des utilisateurs potentiels dans sa constitution.

La pédologie étant une composante principale de la productivité agricole, la connaissance locale est particulièrement abondante pour décrire les sols à usage agricoles : tant pour leur délimitation que leur qualification.

Pour intégrer des connaissances locales, nous recommandons une approche de cartographie participative en groupe de 5 à 10 participants. Dans ce type d'atelier, il est possible de mobiliser des experts agricoles tels que des conseillers ou des salariés de coopératives (connaissances globales sur le territoire) et des exploitants agricoles pour leur connaissance empirique, spécifique d'une situation locale. L'animateur de l'atelier doit chercher à faire s'exprimer les participants. Il doit faciliter la délimitation des zones pédologiques soit directement sur une carte (ex. zonage) soit par la description de repères biophysique (ex. isoligne d'altitude) ou disponibles par ailleurs (ex. usage du sol).

## **Proposition d'une méthodologie d'hybridation de diverses sources d'information**

Cette partie présente une méthodologie générique en 4 étapes. Chaque étape est illustrée par les choix et méthodes mises en œuvre pour l'utilisation de la plateforme MAELIA sur le territoire de l'Aveyron Aval.

### 1) Mobiliser une base de données pédologique générique

#### **a) Selon l'étendue et la disponibilité, mobiliser la BDGSF ou un RRP dans un logiciel de SIG**

Il convient de réaliser un découpage et un affichage des UCS calqué sur les limites du territoire, avec d'autres éléments représentés dans le modèle. Cela permet d'appréhender la cohérence spatiale de la BDD avec (délimitation et précision d'échelle). Aucun RRP n'étant pour le moment disponible en région Midi-Pyrénées, c'est la BDGSF qui a été utilisée.

#### **b) Evaluer les variables nécessaires pour le modèle**

Dans la plateforme MAELIA, l'information pédologique est utilisée dans les modules agricole et hydrologique. Plus précisément, elle permet le fonctionnement du modèle de simulation de la croissance des cultures (AqYield) et du modèle hydrologique (SWAT). Pour AqYield, il est nécessaire de renseigner un type de sol pour chaque ilot de culture RPG (échelle minimale requise : l'ilot de culture). Pour SWAT, il faut pouvoir attribuer des proportions de types de sol à chaque bassin versant (échelle minimale requise : le bassin versant élémentaire). Les variables quantitatives qui doivent être renseignées sont indiquées dans le tableau 3.

Tableau 3 : Variables sol nécessaires au fonctionnement des modèles mobilisés par MAELIA

Variables sols	AqYield	SWAT
Epaisseur des horizons (m)		X
Profondeur d'enracinement (m)	X	X
Teneur en argile (%)	X	X
Part des éléments grossiers (%)	X	X
Teneur en matière organique (%)	X	
Réserve Utile (mm)		X
Conductivité hydraulique à saturation (mm/jr)		X
Densité apparente (g/m <sup>3</sup> )		X
Nombre total de variables d'entrée	4	7

L'unité InfoSol de l'INRA Orléans a été mobilisée pour produire, à partir des variables de la BDGSF, les variables nécessaires aux modules agricoles et hydrologiques du modèle. Afin de rendre ce travail générique, les fonctions de pédo-transfert ont été utilisées sur tous les UTS de la France et sont donc disponibles dans la BDD de MAELIA.

- Cette étape aboutit à une première quantification des variables nécessaires pour le modèle de territoire, mais leur spatialisation reste floue.

## 2) Rechercher des cartes de sol locales

Un travail bibliographique permet d'identifier une carte des sols au 1/500 000, disponible sur le département du Tarn et Garonne. Elle fournit une cartographie des types pédo-morphologiques, équivalents aux UCS de la BDGSF mais de meilleure précision, mais ne donne ni qualification ni quantification des variables nécessaires pour le modèle.

- Cette étape aboutit à une délimitation des unités cartographiques de sols (UCS) affinée, mais ne permet pas de répartir les UTS.

## 3) Conduire un atelier de cartographie participative

Lors d'un atelier de cartographie participative, il est possible de réunir des experts des territoires (techniciens grandes cultures de Chambre d'agriculture) et de soumettre à leur avis critique la carte locale des types géomorphologiques (1/500 000), découpée aux limites du territoire modélisé.

### a) Délimitation de zones pédologiques

Il est demandé aux participants de valider ou re-délimiter les zones proposées par la carte locale. Ils font leurs propositions directement sur la carte (*dans l'espace géographique*) ou en faisant appel à des repères du territoire (*espace paramétrique*) tels qu'une côte d'altitude.

### b) Discussion des variables descriptives des sols agricoles

L'animateur présente les variables descriptives des UTS majoritaires des UCS qui recoupent le territoire. Les participants peuvent moduler les variables et devront attribuer une ou plusieurs UTS à chaque zone pédologique.

Les participants pourront aussi donner des éléments de précision qu'ils jugent nécessaires de prendre en compte pour le modèle. Par exemple sur le territoire de l'Aveyron aval, les participants à l'atelier de cartographie participative ont mis en avant l'existence de « poches » de sols aptes à la monoculture de maïs au sein des zones pédologiques. Ils ont proposé de considérer que ces sols sont moins argileux, ce qui a pu être pris en compte en mobilisant une information sur les séquences de cultures issue du RPG (cf. Figure 6)

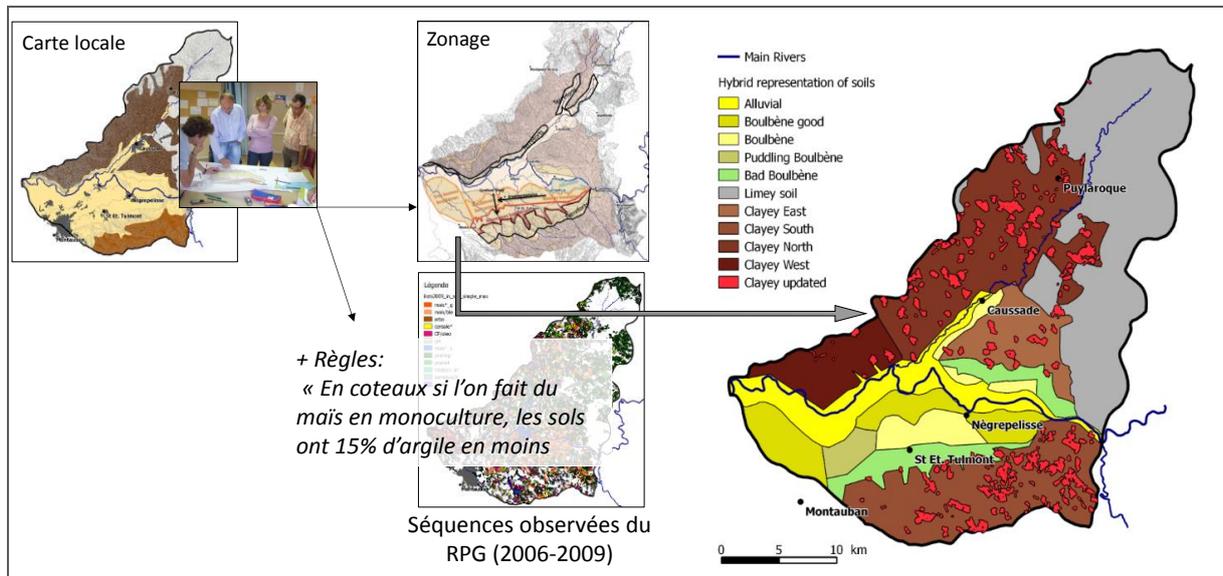


Figure 6 : Illustration de la méthode de cartographie participative et des informations récoltées © Clément Murgue

#### 4) Intégrer l'information dans un SIG

La dernière étape consiste à :

- a) Délimiter des UCS sur la base de la carte locale et des éléments proposés par les participants de l'atelier de cartographie participative (les UCS de la BDGSF sont alors obsolètes)
- b) Faire correspondre une seule UTS, donc ses caractéristiques quantitatives, aux nouvelles UCS
- c) Mettre à jour le zonage et certaines caractéristiques de sols sur la base de l'information donnée par les acteurs

#### Encadré 2 : Spatialisation des UTS au sein des UCS - Exemple d'approche algorithmique

Selon les moyens disponibles, une approche d'hybridation de l'information peut sembler coûteuse. Nous proposons l'approche algorithmique suivante, qui ne mobilise que des bases de données de type BDGSF ou RRP et le Corine Land Cover (CLC).

1. Classement des UTS par leur probabilité d'appartenir à un sol agricole sur la base d'un indice de qualité des sols (Balestrat 2011). On peut réaliser ce classement sur la base d'un arbre des contraintes à trois niveaux
  - Contrainte absolues: ex. salinité (contexte méditerranéen)
  - paramètre principal de hiérarchisation: réserve utile
  - contraintes secondaires: pente, hydromorphie, pierrosité, ph, battance
2. Attribution des UTS aux usages de sols présents dans les UCS sur la base du CLC
  - Attribution des UTS avec l'indice de qualité le plus élevés aux surfaces agricoles (RPG) en priorité
  - Attribution du reste des UTS aux surfaces correspondantes à d'autres usages, de manière aléatoire ou orienté

## 9. Annexe 3 : Représenter la variabilité spatiale des données météo

Le climat est un élément du territoire impactant à la fois le système hydrologique et le système agricole. Pour affecter une série climatique aux bassins versants et aux parcelles, l'approche la plus classique consiste à utiliser en entrée une série climatique maillée.

Pour les analyses territoriales en France métropolitaine, les données SAFRAN sont fréquemment utilisées. Les données SAFRAN sont des données horaires de température, humidité, vent, précipitations solides et liquides, rayonnement solaire et infrarouge incident produites par Météo-France (Centre National de Recherches Météorologiques, CNRM) à partir des observations d'un ensemble de stations météo sur le territoire, combinées à des données d'analyse de modèles météorologiques. Ces paramètres sont analysés par pas de 300m d'altitude. Ils sont ensuite interpolés sur une grille de calcul régulière (8 x 8 km). A l'origine conçu pour les zones montagneuses, le système SAFRAN a été par la suite étendu à l'ensemble de la France (<https://www6.inra.fr/agadapt/Regional-planning/Source-of-data/SAFRAN>). Pour affecter un climat à un bassin versant élémentaire, on peut alors se contenter de prendre le climat issu de SAFRAN en prenant la moyenne des paramètres climatique des mailles SAFRAN, pondérée par la surface interceptant la surface du bassin versant. Dans les zones montagneuses, où l'on peut observer un écart significatif d'altitude au sein du bassin versant (par exemple de 400m à 1200m d'altitude) et/ou un écart avec l'altitude moyenne de la maille SAFRAN, on peut affiner le climat perçu par le bassin versant en créant des classes d'altitude et en ajustant le climat sur ces classes d'altitude. Cet ajustement du climat (par exemple,  $-0.6^{\circ}\text{C}/100\text{m}$  d'écart d'altitude) est notamment nécessaire pour modéliser correctement la neige par classe d'altitude (cf. formalisme du modèle SWAT®). L'affectation d'un climat aux îlots (et donc aux parcelles) suit la même approche : on réajuste le climat moyen de l'altitude.

Bien que le climat SAFRAN soit le climat le plus fréquemment utilisé, d'autres reconstructions statistiques de climat existent. Nous avons choisi de tester une approche différente, à travers l'outil ClimBox d'Arvalis (Le Bris, 2008). Cet outil extrapole spatialement le climat en tous points à partir des données de stations météo (données achetées au réseau de Météo-France), en utilisant des régressions linéaires, quadratique et des krigeages. Nous avons utilisé cet outil pour créer un climat sur des mailles de 2 km x 2 km, puis nous avons évalué la sensibilité de notre représentation du territoire Tarn aval au climat fourni en entrée. En parallèle, sur ce même territoire, nous avons effectué une validation croisée (à partir des données des stations météorologiques ponctuelles disponibles) pour mieux connaître les capacités prédictives de SAFRAN d'un côté et de ClimBox de l'autre.

Notre première constatation est que les volumes d'irrigation simulés sont significativement différents selon le mode d'estimation des données météo retenu (environ 14% en moyenne, Figure 8). Compte-tenu de l'état actuel du paramétrage du modèle<sup>5</sup>, les volumes consommés par l'irrigation dans la simulation avec ClimBox, semblent mieux correspondre à l'observation sur le terrain.

---

<sup>5</sup> A noter que l'instanciation du territoire Tarn aval n'est pas totalement finie : pas de zonage administratif de restriction, pas de paramétrage pour la gestion des canaux et barrages. De plus, ce territoire n'a été pour le moment que partiellement évalué.

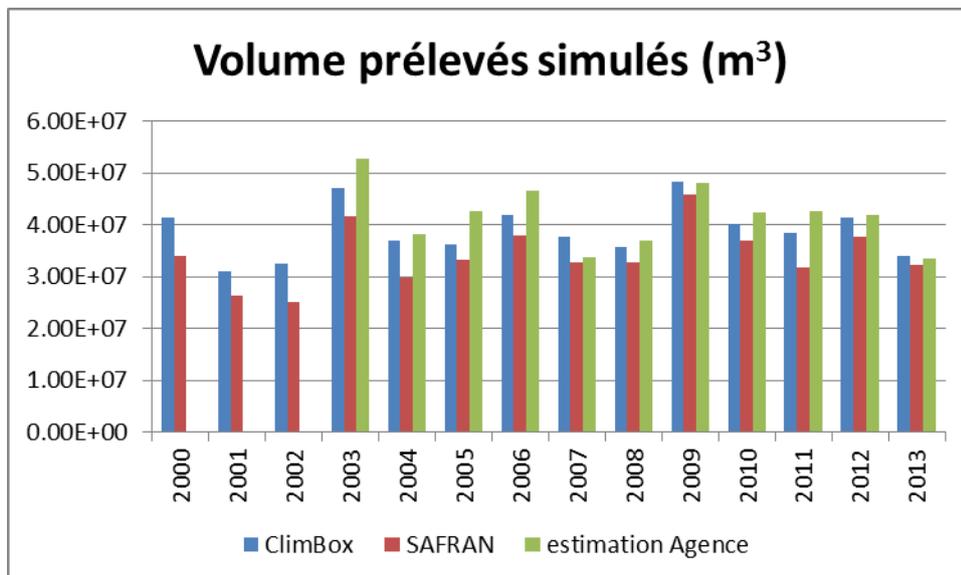
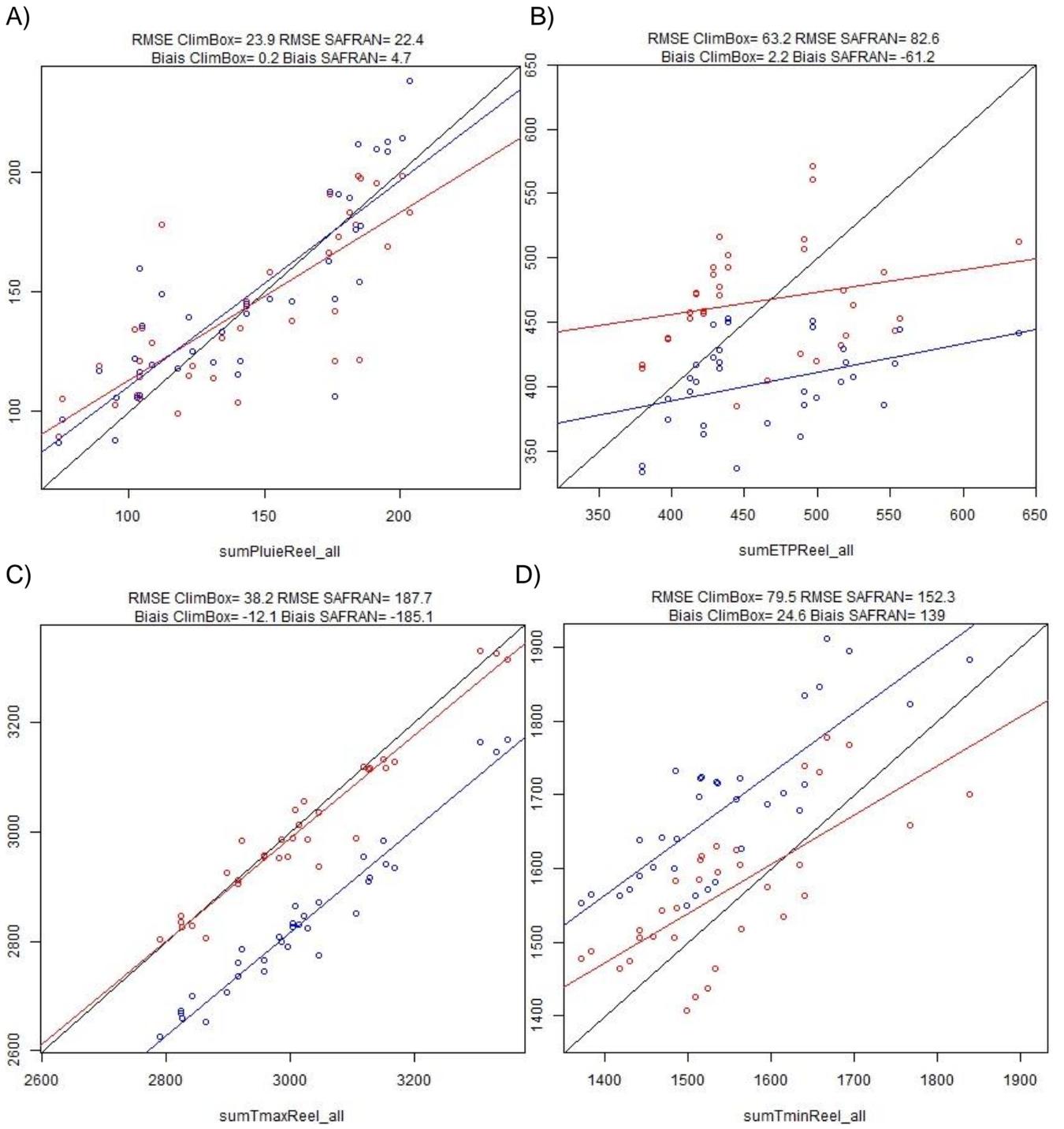


Figure 7. Comparaison des simulations des cumuls d'eau prélevés pour l'irrigation pour les années 2000 à 2013 sur chacun des bassins versants du Tarn aval. En bleu, les volumes simulés à l'aide du climat spatialisé par ClimBox, en rouge à l'aide du climat SAFRAN et en vert les volumes estimés par l'Agence de l'eau. © Romain Lardy

La validation croisée à partir des données des stations météorologiques ponctuelles disponibles nous permet (Figure 8) de voir :

- Une qualité de prédiction des précipitations similaire entre SAFRAN et ClimBox sur ce territoire (Figure 8, A).
- Une sous-estimation systématique par SAFRAN des températures maximales, en moyenne de -2°/jour, pour une sous-estimation négligeable (de - 0.13°/jour) pour ClimBox (Figure 8, C).
- Une surestimation systématique par SAFRAN des températures minimales (~1.7°/jour), tandis que ClimBox les surestime légèrement (+0.27°C/jour en moyenne) (Figure 8, D).
- Une faible sous-estimation de la température moyenne par SAFRAN (-0.25°C) et un biais négligeable pour ClimBox (< 0.1%) (Figure 8, E).
- une sous-estimation systématique de l'ETP (biais journalier de -0.67 mm) par SAFRAN, tandis que la prédiction de l'ETP par ClimBox ne présente pas de biais systématiques et son erreur quadratique moyenne est plus faible que celle de SAFRAN (respectivement 0.9mm/j pour SAFRAN et 0.69mm pour ClimBox) (Figure 8, B).
- On retrouve une tendance à la surestimation du bilan climatique hydrique (P –ETP) par SAFRAN (biais journalier de 0.7 mm), imputable à la sous-estimation de l'ETP par SAFRAN, tandis que ClimBox ne présente pas de biais significatif. A noter, quand même que l'erreur de prédiction est assez forte (RMSE journalière : 0.86mm pour ClimBox et 0.98mm pour SAFRAN) (Figure 8, F).



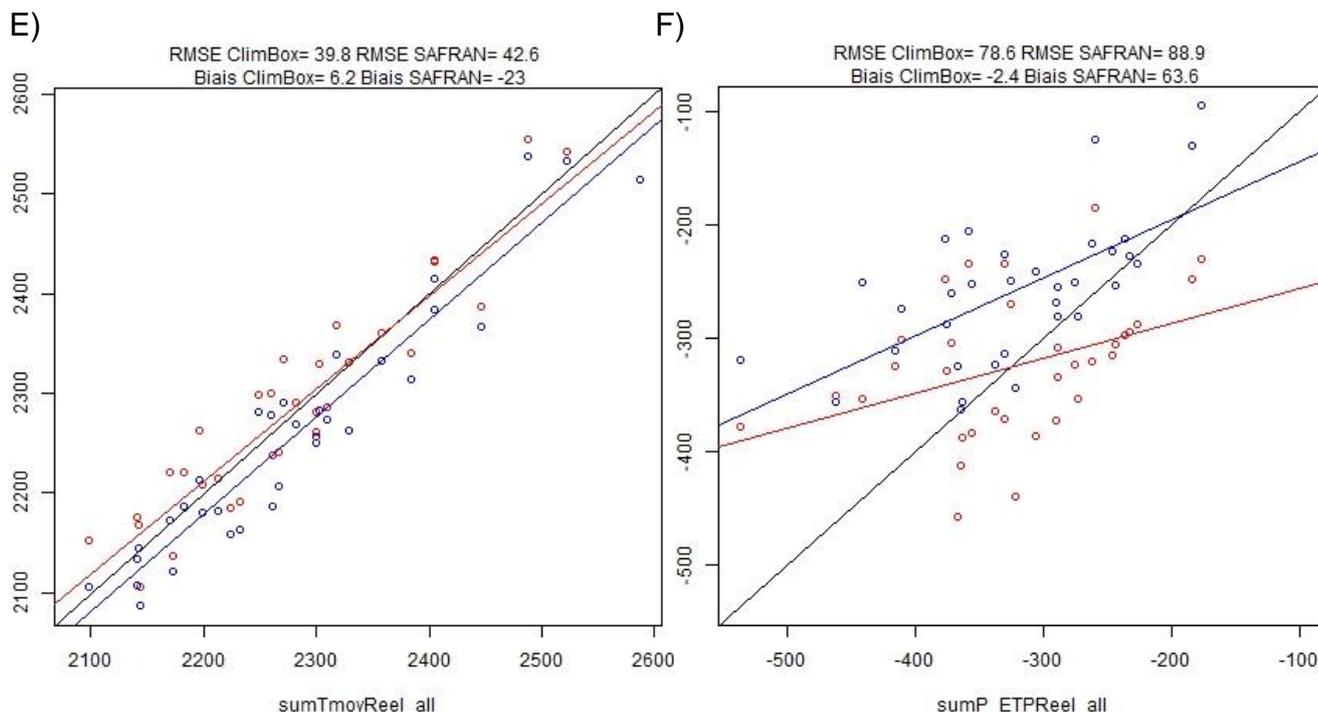


Figure 8. Validation croisée des climats spatialisés par ClimBox (en rouge) ou par la reconstruction SAFRAN (en bleu). Les variables comparées sont sur A) les précipitations, B) les ETP, C) les températures maximales et D) les températures minimales, E) les températures moyennes, F) P-ETP du 15 juin au 15 septembre, de 2001 à 2013, sur le territoire du Tarn aval. Chaque point représente un cumul par an par site de mesure. © Romain Lardy

En résumé, les résultats montrent des différences significatives dans le climat et dans les sorties de simulations. Sur la base de ces résultats<sup>6</sup> et notamment sur la validation croisée, on peut conclure qu'il est toujours **préférable d'utiliser ClimBox pour les températures** (surtout si on utilise la température min et la température max). A noter cependant que pour les zones de montagne (altitude > 800m), le réseau de stations de mesure utilisé par ClimBox étant significativement plus faible, la qualité de reconstruction du climat devrait être plus faible, il pourrait alors être plus intéressant d'utiliser SAFRAN.

Dans les zones agricoles (et donc fortement couvertes pas le réseau Arvalis), ClimBox montre des résultats de reconstruction **des précipitations similaires à SAFRAN**. De plus, dans ces zones, l'utilisation des précipitations spatialisées par ClimBox ou celles de SAFRAN n'induit que peu de différences sur les simulations.

L'**ETP** semble être la composante du climat **la plus problématique** et dont la qualité (voir la validation croisée) est la moins bonne. Dans les zones agricoles (non montagneuses), la qualité de prédiction de l'ETP semble meilleure avec ClimBox.

L'utilisation du climat spatialisé par **ClimBox semble une meilleure alternative que l'utilisation de SAFRAN sur les zones bien couvertes par les stations météo achetées par Arvalis**. En revanche, pour les autres territoires, notamment les zones de montagnes (altitude > 800 m), il conviendra de rester prudent sur qualité des données climatiques et dans la mesure du possible (collaboration par exemple) utiliser/ compléter avec d'autres sources de données (par exemple, utiliser SAFRAN sur les zones d'altitude supérieure à 800m).

Le Bris, 2008. *Note sur la validation et la prédiction des données météorologiques au sein de la base de données EOLE*. Rapport interne Arvalis. 12p

<sup>6</sup> L'analyse des climats a également été effectuée sur les territoires Aveyron aval et Garonne Amont [données non montrées]

## 10. Annexe 4 : Représenter le matériel d'irrigation

Le matériel d'irrigation est un élément structurant pour l'organisation du travail pendant les périodes d'irrigation. En effet, outre les contraintes de main d'œuvre, les irrigants considèrent la disponibilité et les caractéristiques de leur matériel pour définir leurs pratiques d'irrigation : temps de retour (ou *tour d'eau*) et dose. Le type de matériel et les pratiques associées vont conditionner les dynamiques de prélèvement sur le parcellaire des exploitations et donc de manière cumulée, sur le territoire.

Pour constituer un modèle de territoire qui représente l'irrigation de manière dynamique, il est donc important de considérer les matériels disponibles sur les exploitations. Cependant, aucune information formelle n'existe sur ce sujet. Il est donc nécessaire de recourir à des estimations qui reposent sur de l'expertise. Nous proposons une méthode qui mobilise l'expertise de conseillers d'irrigation pour définir des règles de distribution des matériels au sein de l'exploitation du territoire, et des bases de données pour appuyer un algorithme issu de cette description.

### 1) Eliciter des règles d'allocation avec des experts

Il est très important d'expliquer aux experts que l'objectif n'est pas de représenter une réalité exacte mais de représenter la variabilité de type et la distribution des matériels d'irrigation dans le territoire qui permettra de retracer les dynamiques spatiales et temporelles de prélèvement en eau d'irrigation. Puis on conduit les deux étapes suivantes avec les experts locaux :

#### a) Définir une liste des matériels existants sur le territoire et leurs caractéristiques

Tableau 4 : Exemple de table de caractérisation des matériels utilisés pour l'irrigation sur le territoire (issu d'un atelier sur le Tarn Aval dans le cadre de SIMULTEAU)

Matériel	Tour d'eau (j)	Vitesse d'avancement (ha/jr)	Dose (mm)
Pivots	3	7	35
Enrouleurs puissants	7	2.5	30
Enrouleurs faibles	9	1.2	40
Couverture intégrales	7	2.5	35
Goutte à goutte	1	20	5

#### b) Définir des règles d'allocation de ce matériel

On demande aux experts de décrire les patrons de distribution du matériel, puis de quantifier, notamment en termes de surface, la part de chaque matériel au sein du territoire et la part maximale possible au sein de chaque exploitation

Exemple de discours recherché : « *Les pivots se situent en majorité dans les basses vallées, sur les parcelles de plus de 10 ha. Les couvertures intégrales sont disposées uniquement sur les parcelles de semences. Les enrouleurs sont utilisés sur le reste des parcelles, les plus puissants se trouvent dans les sols les plus drainants* ».

### 2) Développer et utiliser un algorithme probabiliste

L'algorithme va mobiliser des bases de données spatiales pour ajouter une information à chaque ilot du RPG, en se basant sur une approche probabiliste.

**Exemple : Algorithme de principe développé pour allouer les pivots aux ilots du territoire Aveyron Aval**

- Lister les exploitations susceptibles d'avoir pivot (au moins un ilot de grande culture irrigué  $\geq$  à 15ha)
- Ordonner les exploitations par SAU, en ordre décroissant
- affecter un « pivot » aux ilots des exploitations les plus grandes en commençant par ceux en *terrasses* avec les limites suivantes :
  - ⇒ max 20% de la SAU de chaque exploitation
  - ⇒ et jusqu'à max 15% de la surface en grande culture irriguée du territoire (1653 ha)

### 3) En réunion

- Discuter des résultats de l'allocation sur la base d'une cartographie des équipements d'une analyse statistique
- Eventuellement revoir l'algorithme

## 11. Annexe 5 : Représenter le lien entre surfaces irriguées et ressources en eau

Un des enjeux du développement d'un « modèle de territoire » est d'être en mesure d'associer des surfaces agricoles irriguées aux différentes ressources en eau utilisées pour l'irrigation c.-à-d. de modéliser les relations hydrauliques entre des surfaces irriguées et des ressources en eau. Ces relations peuvent être « multiples » c.-à-d. qu'une parcelle irriguée peut être connectée à plusieurs ressources en eau (ex. un cours d'eau et une retenue) et une ressource en eau peut être utilisée pour irriguer différentes parcelles. La modélisation de ces relations hydrauliques est basée sur l'utilisation des données disponibles sur les points de prélèvements agricoles (PPA) et les surfaces irriguées.

**Pour spatialiser finement les surfaces irriguées il est possible d'utiliser les données fournies par le RPG.** La principale faiblesse de cette base de donnée est liée au fait que l'information sur la présence de culture(s) irriguée(s) dans un îlot RPG est seulement fournie pour les 3 années de 2007 à 2009. A partir de 2010 les aides du premier pilier de la PAC n'étant plus liées à l'irrigation cette information n'est plus renseignée dans le dossier PAC des agriculteurs. Pour surmonter cette limite deux stratégies sont envisageables. La plus simple est de considérer que (a) les surfaces irriguées au moins une fois sur ces trois années permettent de définir les îlots irrigables et (b) les cultures irrigables (ex : maïs, soja, pois) cultivées dans des îlots irrigables sont irriguées l'année considérée (ex. un maïs dans un îlot irrigable est irrigué). L'autre stratégie est d'utiliser la télédétection spatiale pour identifier année après année les surfaces irriguées. Ce type de méthode est en cours de développement et de test par l'UMR CESBIO dans le cadre de différents projets de recherche appliquée (ex. le projet CASDAR SIMULTEAU et un projet FUI MAISEO). Ces projets, en cours, ont pour objectif d'estimer la capacité prédictive et l'opérationnalité de ce type d'approche en cours de saison et a posteriori (après la saison culturale).

**Concernant les données sur les points de prélèvements agricoles plusieurs jeux de données existent.** Les données issues des déclarations auprès des Agences de l'Eau (AE) donnent des informations sur le géoréférencement des points de prélèvement agricole et permettent l'identification des ressources en eau impactées, mais elles sont souvent imprécises (ex. spatialisation au centroïde de la commune, pas d'identifiant de la ressource utilisée). Les données collectées par les DDT, dans le cadre de la procédure de déclaration ou d'autorisation des prélèvements en eau, sont plus précises en termes de spatialisation des points de prélèvements et de rattachement à une ressource. Le développement de la Banque Nationale des Prélèvements en Eau<sup>7</sup> (BNPE) a pour objectif à terme de permettre de rassembler au sein d'un même système d'information (même schéma de base de données) les données liées aux prélèvements en eau gérées par les AE et celles gérées par les DDT. La mise en commun de ces données a nécessité la constitution d'un référentiel unique national (un schéma de base de données) relatif aux préleveurs, aux ouvrages et aux points de prélèvements. La BNPE vise à permettre de savoir, qui prélève, où, combien, comment et pour faire quoi, et cela au niveau national (sur toute la France). Le dictionnaire de données est disponible sur le site du SANDRE<sup>8</sup>.

Notre expérience de travail avec les données des AE a mis en évidence la mauvaise qualité des relations hydrauliques modélisées entre des surfaces irriguées et des ressources en eau du fait des imprécisions attachées à ces données. C'est pourquoi, nous recommandons une approche valorisant les données des DDT.

Beaucoup de DDT disposent d'un outil, l'outil OASIS, leur permettant d'instruire et suivre les déclarations et les autorisations de prélèvements dont les services de police de l'eau ont la responsabilité (Eau potable, irrigation et certaines industries non ICPE). OASIS permettra à terme également d'alimenter la BNPE avec les données gérées par les DDT : (i) identifiant du préleveur, (ii) ressource impactée, (iii) période de prélèvement, (iv) débit/volume autorisé et (v) pour l'irrigation : culture, type de sols et surfaces associées. Toutes ces données ne sont pas obligatoires. Par exemple, les informations sur les cultures, surfaces et plus encore le type de sols ne sont renseignées que par très peu de DDT.

Par ailleurs, il est important de noter que les (nouveaux) OUGC devraient faire remonter en décembre de chaque année, à la DDT avec laquelle chacun d'eux est en relation, les informations sur les prélèvements agricoles réalisés dans l'année. Cette donnée sur les prélèvements annuels était, jusqu'à

<sup>7</sup> Les spécifications fonctionnelles générales de la banque sont disponibles à l'adresse :

<http://www.reseau.eaufrance.fr/ressource/sfg-bnpe-0>

<sup>8</sup> [http://sandre.eaufrance.fr/ftp/documents/fr/ddd/prl/2/sandre\\_dictionnaire\\_PRL\\_2.pdf](http://sandre.eaufrance.fr/ftp/documents/fr/ddd/prl/2/sandre_dictionnaire_PRL_2.pdf)

récemment, uniquement recueillie par les AE. Cette information fournie par les OUGC aux DDT permet de constituer au niveau des OUGC et des DDT (dans l'outil OASIS) un jeu d'information complet sur les prélèvements comportant au moins pour chaque préleveur agricole : la spatialisation du points de prélèvement agricole, la ressource impactée, le volume/débit autorisé, le volume annuel prélevé... Suivant leur volonté les OUGC pourront également recueillir et enregistrer d'autres informations clefs. Ainsi, l'outil développé sous la maîtrise d'ouvrage de l'Assemblée Permanente des Chambres d'Agriculture (APCA) pour les Chambres d'Agriculture qui sont OUGC prévoit la possibilité de recueillir des informations suivantes pour chaque point de prélèvement de chaque exploitation ou préleveur (ex. ASA): culture, surface, équipement d'irrigation, irrigation prévisionnelle et irrigation réalisée.

Si cette évolution des outils au sein des DDT et des OUGC et des flux de données entre ces 2 organisations ouvre la voie idéale pour disposer d'une base de données précise et exhaustive liant surfaces irriguées et ressources en eau, il faut cependant considérer que l'établissement d'une telle base de données au sein des OUGC (et potentiellement des DDT) prendra du temps et sera réalisée au fil des années à venir à des rythmes différents d'un territoire d'OUGC à un autre. Dans l'attente, une alternative serait de mettre en relation les données du RPG et les données sur les prélèvements au sein des DDT.

Grâce à ces évolutions technologiques et institutionnelles, les DDT disposent en effet, depuis peu, de données assez fines sur le géoréférencement des PPA et les volumes prélevés. Elles disposent également d'un accès aux données du RPG non anonymisées. Or ces deux bases de données ont des identifiants en commun : le n° SIRET/PACAGE des exploitants agricoles et préleveurs. Les institutions ayant accès aux données individuelles non anonymisées de ces deux bases peuvent donc mettre en relation les informations sur les exploitations agricoles du RPG et les préleveurs individuels. Les services de l'Etat pourraient donc réaliser cet appariement de bases de données et fournir une base de données RPG anonymisées enrichies des informations sur les PPA (géoréférencement et information sur volumes et préleveurs). Une fois cette mise en relation des bases de données réalisée il est possible d'**estimer les relations hydrauliques entre surfaces irriguées et ressources en eau par analyse de la proximité spatiale des PPA et parcelles irriguées**. Considérant un seuil de distance de connexion hydraulique, cette analyse spatiale de proximité, conduit, dans certains cas, à modéliser des connexions multiples entre parcelles et PPA. Dans cette approche, le (ou les seuils) de distance maximale de connexion hydraulique doit être déterminé sur la base des connaissances expertes locales (par ex. par le chargé irrigation de la chambre d'agriculture). Cette approche ne permet pas d'identifier les connexions de parcelles à des réseaux collectifs d'irrigation tels que ceux des ASA. Pour modéliser ces relations, il est possible de **collecter les données locales sur la position spatiale des réseaux et bouches d'irrigation** et d'appliquer des traitements spatiaux, du même type que ceux décrit ci-avant, pour estimer des relations hydrauliques. Lorsque les données locales sur la position spatiale des réseaux n'existent pas il est possible de s'appuyer sur l'expertise locale (ex. président d'ASA, conseiller irrigation des chambres) pour estimer les parcelles connectées à un réseau d'irrigation donné considérant les parcelles connectées à des PPA de préleveurs individuels.

La possibilité que les services de l'état (DDT ou DRAAF) réalisent le travail d'appariement des bases de données et délivrent une base de données RPG anonymisées et enrichies des informations sur les PPA reste à déterminer. Des discussions entre les membres du projet CASDAR SIMULTEAU et les services de la DRAAF Midi-Pyrénées ont eu lieu récemment pour évaluer la faisabilité de ce type d'opération : s'il n'y a pas a priori de problème technique, des questions juridiques empêcheraient la DRAAF de diffuser la base de données appariée même si les données sont anonymisées.

## 12. Annexe 6 : Représenter les systèmes agricoles

*Le texte ci-dessous correspond à l'article scientifique soumis à la revue Agricultural Systems le 2 octobre 2016.*

### **A rapid, spatially explicit approach to modeling cropping systems at the regional scale**

Davide Rizzo <sup>1,\*</sup>, Olivier Therond <sup>1,2</sup>, Romain Lardy <sup>1,3</sup>, Clément Murgue <sup>4</sup>, Delphine Leenhardt <sup>1</sup>

<sup>1</sup> UMR AGIR, INRA, Université de Toulouse, 31326, Castanet Tolosan, France

<sup>2</sup> UMR LAE, INRA, Université de Lorraine, 68000, Colmar, France

<sup>3</sup> ARVALIS - Institut du Végétal, 75016, Paris, France

<sup>4</sup> Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne, 65000 Tarbes, France

\*Corresponding author: [ridavide@gmail.com](mailto:ridavide@gmail.com). Present address: Institute of Life Sciences, Scuola Superiore Sant'Anna, 56127, Pisa, Italy.

**Abstract.** Local land managers need spatially explicit information about agricultural practices to address issues that arise from the use of natural resources in agriculture. One main characteristic of agriculture is its great variability in space and time. However, describing the spatial distribution of “cropping systems”, i.e. crop sequences and crop management systems at the regional scale, remains a major scientific challenge. This study presents a new, simple and rapid approach to model the spatial distribution of irrigation management practices. It was developed in two large watersheds in southwestern France. Based on a previous study consisting of 27 farmer interviews in a study area about one-sixth the size of these watersheds, we interviewed 12 key informants who had an integrative vision of the study area and spent only one-fourth as much time collecting and processing the relevant data. One major innovation was to combine knowledge from generic databases and ad-hoc intermediate objects, such as diagrams, tables and maps, to interact with the key informants. These objects helped them focus on specific local information that we had missed and facilitated data processing. Interview results were used to spatially allocate cropping systems and to formalize crop management systems as dynamic IF-THEN decision rules. We indirectly evaluated our approach by using a cropping system model to simulate irrigation withdrawals over a ten-year period. Its predictions reproduced well annual amounts and inter-annual dynamics of irrigation water withdrawals recorded by the regional Water Agency. This approach, combining diagrams with IF-THEN rules, appears easy to adapt to study other areas and agricultural practices besides irrigation, as well as to manage annual and perennial crops.

**Keywords:** decision rules; location factors; key informant approach; dynamic modeling; landscape agronomy; Adour-Garonne watershed

## 1. INTRODUCTION

Agricultural practices and crop performances significantly affect and depend on environmental, social and technical contexts (Ramankutty et al. 2002; Ray et al. 2012; van Vliet et al. 2015). For example, water availability and irrigation technologies allow crop diversification and increase potential yields, but at the same time, the way water is used in crop management may determine the state of resources and possibly lead to conflicts among water users, especially during drought (European Environment Agency 2012; Murgue et al. 2015).

The main characteristic of farmers, compared to others who use natural resources, is the great spatial and temporal variability of their practices. Farmers make their decisions, both strategic (e.g., crop rotation, irrigated versus rainfed crop production, maize earliness) and tactical (e.g., starting/stopping irrigation and its dose), according to the biophysical environment – particularly the spatiotemporal conditions of the soil, weather and plants – as well as the socio-economic context (e.g. prices, regulations). In addition, some management practices, such as irrigation or fertilization, are complex combinations of technical operations at successive dates (e.g. water or fertilizer applications).

Local land managers need spatially explicit information about agricultural practices to address issues caused by their dynamic interactions with natural resources (Bailly et al. 2010; Benoît et al. 2012; Glavan et al. 2015; Yunju et al. 2012). Agronomic research has developed reliable methods to characterize or simulate different components of farming systems from field to landscape scales (Jahel et al. 2016; Lovell et al. 2010; Nesme et al. 2010; Oliver et al. 2010; Thenail et al. 2009). Nevertheless, research in agronomy (e.g., Boiffin et al. 2014; Deffontaines 1973; Duru et al. 2015; Leenhardt et al. 2010) and various interdisciplinary approaches (e.g., Moss 2000; Rounsevell and Arneth 2011; Scherr and McNeely 2008) repeatedly mention the need to improve methods to describe agricultural practices at the regional scale to address natural resource management issues from a more general land system perspective (Rounsevell et al. 2012).

In this regard, a consistent approach would be useful for exploring land management practices and integrating them at various spatial and temporal scales. This would help formalize the knowledge that farmers and other land managers use to make their decisions (Macé et al. 2007; McCown 2012; Sarangi et al. 2004); however, to be reliable, this approach should obtain knowledge about all components of “cropping systems”.

A cropping system, defined for a uniformly managed spatial unit, is a dynamic entity that corresponds to a sequence of crops and the management system for each crop in the sequence. The crop management system is the set of technical operations applied to the crop, for all management practices: soil tillage, cultivar choice, fertilization, weed and pest management, irrigation, etc. (Aouadi et al. 2015; Sebillotte 1990). Describing the spatial distribution of crop sequences and the related management systems at the regional scale to address natural resource management needs to consider (i) biophysical and socio-economic conditions driving the spatial distribution of cropping systems, hereafter called *location factors* (Clavel et al. 2011; Temme and Verburg 2011); and (ii) dynamics of crop management systems and thus the *decision process*, which determine the nature and timing of each technical operation. Therefore, the spatial distribution of cropping systems can be controlled by location rules and dynamic decision rules.

Describing the spatial distribution of cropping systems at the regional scale remains a major scientific challenge (Leenhardt et al. 2010; Murgue et al. 2016; Rizzo et al. 2013; Therond et al. 2009). To this end, one can use quantitative databases based on national surveys or measurements, such as censuses, official statistics and observation/simulation data of natural phenomena (e.g. climate) provided by specialized organizations. The advantage of using such databases is their *genericity*, i.e. their potential to serve many purposes in different domains and at different levels of analysis

(Murgue et al. 2016). Nevertheless, we identify three major obstacles that limit complete description of cropping systems with such databases. First, available land cover maps provide insufficient spatial continuity and temporal depth to properly describe crop sequences (Fuchs et al. 2013; Xiao et al. 2014). Second, a lack of information about crop management and other land uses exists; it is generally addressed by using land cover as a rough proxy (e.g., Houet et al. 2014; Verburg et al. 2009; Zimmermann et al. 2016). Third, only a few methods can represent the dynamic adaptation of crop management to pedoclimatic conditions (Constantin et al. 2015; Houet et al. 2010; Hutchings et al. 2012). The most advanced are based on crop management decision rules formalized with classic *IF [Indicator] [Operator] [Threshold] THEN [Action1] ELSE [Action2]* rules (Bergez et al. 2001; McCown 2012). Formalization of decision rules coupled with crop models enables simulation of dynamics of crop management systems and their effects on dynamics of the soil-crop system and possibly on natural resources. For example, irrigation decision rules influence water withdrawals, which modify the water resource (Clavel et al. 2012; Murgue et al. 2014). The challenge lies in describing decision rules associated with cropping systems within a region in a way that accounts for the potentially great variability in individual decision-making processes (Leenhardt et al. 2010; Nesme et al. 2005).

Recent improvements in satellite imagery and increased availability of harmonized censuses and surveys at large scales do not adequately describe cropping systems, which are still essentially quantified using input factors (Kuemmerle et al. 2013; Teillard et al. 2012; Verburg et al. 2011). Spatially explicit cropland databases have been developed recently using remote sensing (Bégué et al. 2015; Waldner et al. 2015a), periodic surveys such as the European Land Parcel Identification System (LPIS) (Sagris 2013) and the LUCAS database (Temme and Verburg 2011), and annual surveys such as the Farm Accountancy Data Network (Vitali et al. 2012) and the French TerUti database (Xiao et al. 2014). Although they provide support for crop sequence modeling, studies based on these databases addressed associated management practices only loosely (Kollas et al. 2015; Martínez-Casasnovas et al. 2005; Mignolet et al. 2007; Sahajpal et al. 2014; Steinmann and Dobers 2013), for example, representing average practices or fixed-calendar scheduling, even at large regional scales (Dupas et al. 2015; Therond et al. 2011). Such a static perspective is not appropriate for analyzing dynamic interactions between crop management, weather conditions and natural resource conditions (Murgue et al. 2016; Ruiz-Martinez et al. 2015).

To describe the spatial variability and dynamics of cropping systems, it is critical to combine local knowledge (obtained from interviews, surveys or local databases) with generic information provided by generic databases. To this end, local knowledge is crucial to capture information related to farmers' decisions, i.e. location factors and crop management decision indicators and thresholds. This place-based knowledge is largely implicit and consequently difficult to access (Aubry et al. 1998; Murgue et al. 2016; Toffolini et al. 2015; Tress et al. 2003). Interviews with farmers remain the main approach for obtaining this knowledge (Debolini et al. 2013; Marie et al. 2008; O'Keeffe et al. 2015). However, an exhaustive survey of all farmers in a region can easily become excessively time-consuming (see examples in Maton et al. 2007; Schaller et al. 2012).

Rapid surveys can be limited to easily observable features (Biarnès et al. 2009) or performed on stratified samples based on pre-defined farm typologies (Joannon et al. 2006; Murgue et al. 2016). Despite these simplifications, collecting farm survey data to describe the spatial distribution of cropping systems, including their dynamics, remains time consuming. For example, Murgue et al. (2016) interviewed 27 farmers to describe their decision rules in detail (indicators and thresholds) for maize and other regionally relevant crops in an 840 km<sup>2</sup> watershed (downstream area of the Aveyron River, southwestern France). Each interview lasted approximately half a day. In total, the interviews took more than 13 working days, plus the processing time to formalize all crop management system decision rules ( $\approx 2$  months) (Hipolito 2012). Although the study described spatial distribution of cropping systems with location and decision rules, the process was resource-consuming and therefore would be difficult to repeat for multiple and large study areas.

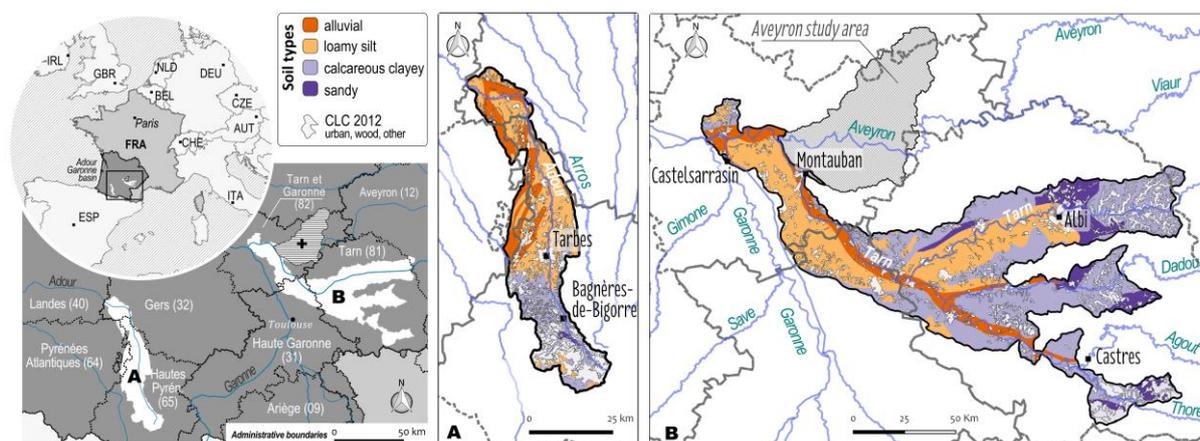
This article presents a simple, rapid approach to describe spatial distribution of current cropping systems at the regional scale in a way that considers their dynamic dimensions and thus can be used

for simulation purposes. It builds on the study by Murgue et al. (2016), which modeled irrigation practices at the watershed scale. We adopted the “key informant” approach (Tremblay 1957) to develop a low-data method for modeling cropping systems at the regional scale (*sensu* Therond et al. 2011). We hypothesized that key informants, in our case local extension agents, have sufficient knowledge to describe crop management practices at the regional scale and identify their most relevant characteristics at the field scale. We tested this approach in two large areas in southwestern France, first in the Tarn River area and then in the Adour River area. Reliability of results was evaluated using a multi-agent, spatially explicit model that simulates effects of the spatial distribution of cropping systems on water withdrawals.

## 2. MATERIALS AND METHODS

### 2.1 Case studies and available data

Focused on interactions between irrigation and water-deficit issues, this study explored irrigation-management practices in two study areas in the Adour-Garonne River basin in southwestern France (116 000 km<sup>2</sup>, Midi-Pyrénées region), which experiences a chronic imbalance between water resources and water needs during the low-water period, which occurs mainly during summer (Debril and Therond 2012; Mazzega et al. 2014). The first area (2 952 km<sup>2</sup>) is located in the downstream area of the Tarn River, one of the main tributaries of the Garonne River. This area is influenced by a Mediterranean climate, with high temperatures in summer and heavy rainfall events in autumn and spring. Of note, this area is contiguous with the Aveyron watershed, the case study by Murgue et al. (2016). The second area (1 446 km<sup>2</sup>) is located in the upstream area of the Adour River, which drains the northern slopes of the French Pyrenees. Recent statistics highlight that it has the highest irrigation water withdrawals in the Adour River basin (OEBA 2015). Its climate is oceanic, with relatively warm and humid weather in summer and heavy rainfall events in winter. The two main soil types in each study area are (i) alluvial and hydromorphic loamy silt soils, mainly associated with fluvial terraces, and (ii) calcareous clayey soils, which predominate elsewhere (Fig. 1 A and B).



**Figure 1.** Locations and characteristics of the study areas (A) Adour and (B) Tarn, which is closer to the Aveyron study area of Murgue et al. (2016) (gray). Non-agricultural areas (white) on the soil maps represent the following CORINE Land Cover (CLC) classes (CLC 2012): urban, woods, wetlands, and water bodies.

As for any area in France, generic databases are available to map the main attributes of the study areas. We used the French LPIS database (for 2006-2012) to (i) map the main annual crops and spatial distribution of fields (ASP 2012), (ii) retrace crop sequences at the field scale, and (iii) identify fields that were declared as irrigated at least once from 2007-2009. Of note, LPIS no longer collected irrigation-related data after 2009. The French LPIS mapping unit is a “farmer’s block” or “Common Agricultural Policy islet”, which corresponds to one or more aggregated contiguous agricultural land parcels (Murgue et al. 2016; Sagris 2013). We also used the CORINE Land Cover database for 2012 (EEA 2015) to complete the land-use map for orchards, typically underrepresented in LPIS, and to

map non-agricultural land cover (i.e., forest and urban). Representing 55% of the total area, arable land dominates in both study areas, but includes different percentages of irrigated area: 28% in the Tarn area and 39% in the Adour area (Table 1). Additional information about cropland composition was obtained from the general agricultural census performed by the French Ministry of Agriculture (Agreste 2010) and freely available at the Local Administrative Unit 2 level, corresponding to a French municipality (Eurostat 2015).

**Table 1.** Main characteristics of the two study areas (for 2012). Source: Land Parcel Identification System (LPIS) and CORINE Land Cover data. The number of crop fields was obtained from LPIS data after processing (see details in Leenhardt et al. 2012)

Characteristic	Tarn	Adour
Area (km <sup>2</sup> )	2 950	1 446
Estimated Farmed Agricultural Area (FAA, ha)	160 961	79 359
Percentage of FAA in total area	55%	55%
Estimated irrigable FAA (ha)	44 595	30 723
Percentage of FAA irrigable	28%	39%
Farms	4 184	2 671
Percentage of irrigated farms	36%	41%
Crop fields	85 484	45 716

We obtained climate data from the SAFRAN database (Vidal et al. 2010) and soil types from the French Geographic Soil Database at a scale of 1:1 000 000, which represents the French portion of the European Geographic Soil Database (Antoni et al. 2007; King et al. 2005). Finally, we used water withdrawal data provided by water users through an annual mandatory report to the Adour-Garonne Water Agency (AEAG 2015). For each water user, these data provide the total amount of water withdrawn at each “withdrawal point”. The locations of only a few points are known precisely; most are approximated as the centroid of the municipality containing the withdrawal point. Since the boundaries of the two study areas did not overlap with municipality boundaries, we multiplied the reported withdrawn water volumes by the percentage of the municipal area located within each watershed, to estimate water withdrawals in each study area.

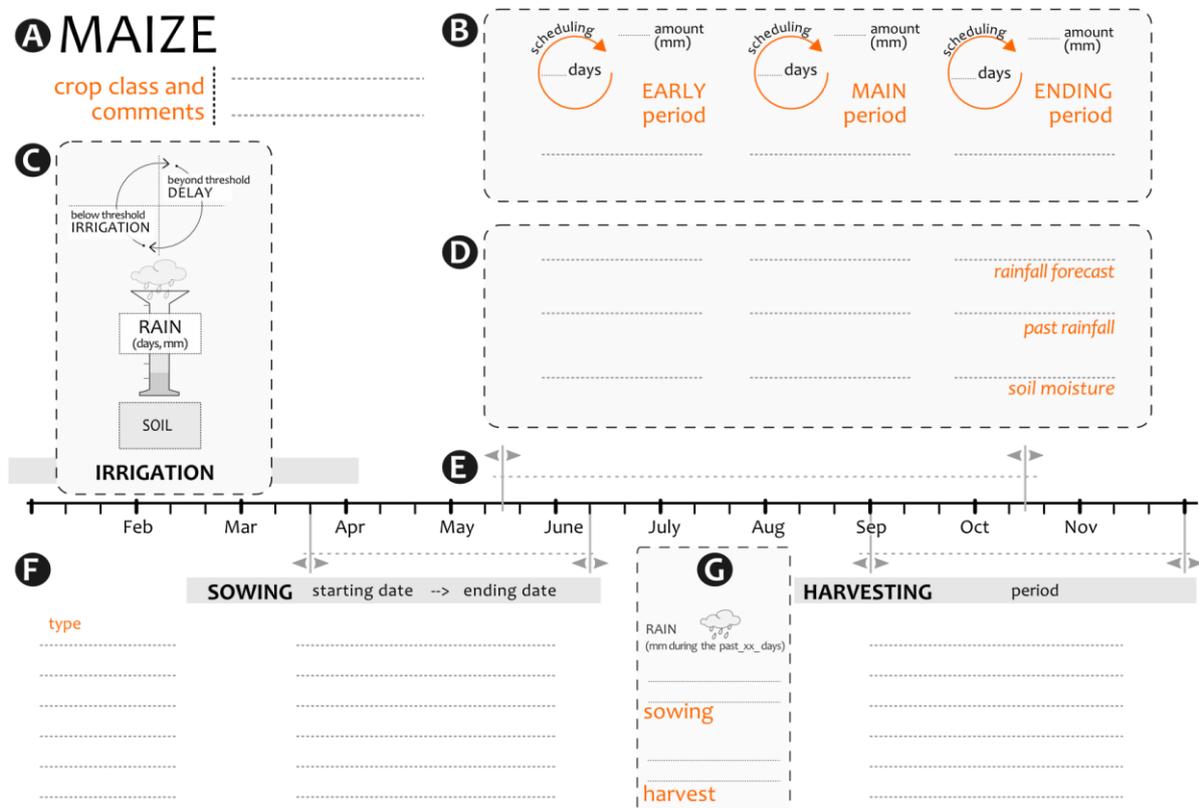
## 2.2 Key informant interviews

To identify key informants, namely experts with knowledge about the spatial distribution and management of the main irrigated crops, we first contacted the manager of the agro-environmental department of the extension service for each of the areas.

We designed the interview script to focus on the question: “How is irrigation managed for the main crops in the study area?” The interview was composed of four steps: (i) identify the main crops in the target area, (ii) create a list of classes for each crop (e.g., for maize: rainfed, irrigated, silage, seed), (iii) describe water consumption (i.e., volumes per period) for the main crops irrigated within irrigated crop classes and (iv) describe indicators and thresholds necessary to define crop management decision rules and location factors used to define location rules.

Interviews were supported by intermediate objects to (i) summarize existing knowledge to highlight and help fill information gaps and (ii) mediate between the researchers and local key informants (Buller 2009; Vinck 1999). The rationale was to facilitate elicitation of decision rules that underlie crop management practices. Finally, these intermediate objects were used to obtain easy-to-formalize, spatially explicit answers, since they provide a framework to pre-process key informants’ discourses into an input format for the simulation model.

The intermediate objects were a map, a table and several diagrams. The map was used at the beginning of the interview to clarify watershed boundaries (Fig. 1 A and B), which differ from those of the administrative unit at which the interviewees work: the *département* (NUTS 3, Eurostat 2015). The table listed the main crops identified from analyzing census data (for 2010) and LPIS and CORINE Land Cover maps (both for 2012). The diagrams (Fig. 2) were designed to help interviewees depict management practices for each main irrigated crop in the region. They were structured around a simplified calendar that explicitly required specifying indicators and threshold values that farmers are expected to use to start or stop sowing, irrigation and harvest. To identify cropping systems associated with each crop, we asked key informants if the values identified for standard management of the crop could vary in space or according to location factors (e.g. crop sequence, soil type, irrigation equipment). For example, key informants indicated that winter wheat can be irrigated if it occurs in the same sequence as maize, otherwise it is rainfed. We also asked key informants to describe an average year and then identify possible adaptations to infrequent conditions (e.g., humid or dry seasons). During the process, we invited key informants to rely on their own field experience of crop management practices rather than on the advice they usually give to farmers.



**Figure 2.** Example of a diagram used during key informant interviews. Interviewees were asked (A) to specify the crop class and (B) to quantify irrigation scheduling (number of days between two applications) during the most relevant periods. Then, after (C) a quick reminder of the modeling approach, they were asked to list (D) indicators (e.g., rainfall, soil moisture) and the associated thresholds farmers use to manage irrigation during (E) the irrigation season. Similarly, the timeline was used to frame (F) the scheduling of sowing and harvesting, for which interviewees were asked to set (G) indicators and thresholds underpinning the decision rules. Source: English translation of the original in French.

These face-to-face interviews were supplemented with phone interviews to obtain missing information about specific crops (e.g., temporary meadows, vineyards). Phone interviews began with the same short introduction as the full interview, which was followed by a short list of questions about crop management decision rules and expected irrigation volumes for a standard cropping season. The interviewer recorded answers on the supports (tables and diagrams) described previously.

Both types of interviews were transcribed into a text editor in preparation for analysis. We processed the local information by grouping all details provided for each crop and cropping system during the interviews to address possible differences among key informants, especially those with different fields of competence.

## **2.3 Modeling cropping systems and their spatial distributions**

Based on the information collected from interviews, we modeled spatial distributions of cropping systems in each study area in four steps.

### **Step 1. Classifying crop sequences**

Processing the 2006-2012 LPIS data allowed us to identify all crop sequences in all farmers' blocks (see details in Leenhardt et al. 2012). Since this list was too large to manage easily, we created a typology of crop sequences useful for considering irrigation. Each type of crop sequence was described by the proportion of each crop in the duration of the sequence, regardless of their order. For example, Maize-Maize-Maize-Soybean-Wheat-Maize belongs to the sequence type "maize, rotation", in which maize occurs more often than any of the other three crops (Table 5). Note that sequence types were defined essentially to infer irrigation management rules. For example, wheat is irrigated only if it occurs in the same sequence as maize but not if it occurs in a rainfed sequence type (e.g., cereal-sunflower).

### **Step 2. Defining the list of crop classes**

A list of crop classes was developed for each study area. Starting from the crop classes mapped in the LPIS and information from interviews about main crops, we aggregated crop classes covering small areas (e.g., different types of set-aside land) or those with similar water use and irrigation practices (e.g., grain legumes and protein crops). We also disaggregated crop classes into new sub-classes when key informants indicated that they had different irrigation management practices (e.g. silage maize vs. grain maize).

### **Step 3. Modeling crop management systems**

Dynamics and locations of crop management systems were modeled using rules developed from information collected during interviews. We used information about indicators and their threshold values to formalize sowing, irrigation, and harvest management rules for each crop. We used information about location factors to develop location rules used to assign a crop management system (described as a set of decision rules) to each combination of [crop sequence type] × [soil] × [irrigation equipment]. This information was stored in a table.

### **Step 4. Defining the spatial distribution of cropping systems**

Cropping systems were assigned to each land parcel in each farmer's block according to the following procedure. The soil type, crop sequence type, irrigation status and irrigation equipment of land parcels were characterized using GIS. The dominant agricultural soil type of each farmer's block from the 1:1 000 000 soil database was assigned to each of its land parcels. If the original LPIS crop class observed on a given land parcel was divided into new classes during step 2, one of these new classes was assigned to the land parcel according to location factors such as the soil type, crop sequence or crop area of the farm it belonged to, while respecting, for each study area, the proportions of these new classes observed in the 2010 agricultural census (Agreste 2010). We assigned the crop sequence of each land parcel to a crop sequence type (defined in step 1) using the Dice percentage similarity index (Dice 1945). Irrigation status of a land parcel was determined using 2007-2009 LPIS data. We assumed that land parcels were potentially irrigated, i.e. equipped for irrigation, if the farmer's block they belonged to was irrigated at least once during those years. Crops that can be managed either with or without irrigation were assumed to be potentially irrigated only if they occurred in a farmer's block equipped for irrigation. Due to a lack of local information about the relative frequencies of

types of irrigation equipment and the location factors that influence them, we assigned the equipment used most in the area (travelling gun sprinkler) to each potentially irrigated farmer's block.

Finally, a crop management system was assigned to each land parcel in each farmer's block in which the crop occurred according to the observed combination of [crop sequence type] × [soil] × [irrigation equipment], using the table constructed in step 3.

## 2.4 Evaluating the approach

It was not possible to evaluate the approach with observed cropping system data because we used all the data available to formalize and spatialize the cropping systems. Therefore, we evaluated the approach indirectly by using a cropping system model to simulate irrigation withdrawals. We compared simulated annual withdrawals to withdrawal data from the AEAG.

The simulation model is part of the agricultural module of the MAELIA multi-agent and spatially explicit simulation platform (Gaudou et al. 2013; Mazzega et al. 2014; Therond et al. 2014; <http://maelia-platform.inra.fr/>). The agricultural module, fully described by Murgue et al. (2014), combines a soil-crop model and a farmer agent model. The former predicts daily soil water balance based on rainfall, evapotranspiration, soil water content and crop development stage (Constantin et al. 2015). The latter applies farmers' decisions using crop management decision rules. Virtual farmer agents check, every day and for each land parcel, whether thresholds encoded in management rules have been reached or exceeded and, if so, perform the corresponding technical operation(s). Note that since the hydrological and normative modules of MAELIA were deactivated, virtual farming agents have access to unlimited water resources.

The spatial distribution of cropping systems developed (in step 4) was used to feed the agricultural module of MAELIA. Through the multi-agent structure of MAELIA, this module (soil-crop and farmer agent models) was run independently for each land parcel in each farmer's block on each farm in each study area. During a simulation, the model reads through the crop sequence each year to find the crop grown, then associates the crop with its management system (i.e., the set of IF-THEN rules) as a function of the crop sequence type, soil and irrigation equipment, based on the table constructed for this purpose. The simulation ran from 2003, an extreme drought season, to 2012, thus covering the period for which LPIS data were available to reconstruct crop sequences (i.e., 2006-2012). Crop sequences observed from 2006-2012 were replicated to cover the years without LPIS data (2003-2005).

Given the many fields simulated (Table 1) and their multiple interactions, our first objective was to reproduce the interannual dynamics of total withdrawal calculated from the AEAG database.

## 3. RESULTS

### 3.1 Key informants interviews

Based on two short interviews (30 minutes each) with the manager of the agro-environmental sector of the extension service for each study area, we identified seven key informants and conducted four semi-structured face-to-face interviews (Table 2). These interviews lasted approximately 2.5 hours each and concerned the two irrigated crop classes that withdrew the most water for irrigation: maize and orchards. Three of the four interviews involved two key informants at the same time. We also conducted three telephone interviews (approximately 20 minutes each) to supplement description of irrigated crops which covered less area or used less water: legumes, vineyards, and alfalfa (Table 2). Altogether, we interacted with 12 extension agents (two managers and 10 technicians, the latter serving as key informants), all of whom worked for the French agricultural extension service.

**Table 2.** Description of key informants (by expected expertise and study area) and interviews (by type, number of people interviewed and duration).

Expected expertise	Key informants		Interviews		
	Tarn	Adour	Telephone	Face-to-face	Duration
Maize production and irrigation practices	2	2		2	320 min
Orchards and drip-irrigation practices	2	-		1	120 min
Cash crops	1	-		1	140 min
Vineyards	1	-	1		20 min
Seed production and legumes	1	-	1		20 min
Pastures and alfalfa	1	-	1		20 min
<b>Total</b>	<b>8</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>640 min</b>

For the two areas, one hour was spent with managers to select the key informants, and subsequent interviews with the latter lasted nearly 11 hours. Transcribing and initial processing of each interview took about five times as long as the interview itself, which corresponded to a total of 48 working hours. About 200 additional hours were needed to formalize the first draft of the decision rules for testing with the simulation model. In total, the key informant approach required approximately 260 working hours for the two study areas.

### 3.2 Cropping systems

We recorded 23 crops out of the 27 theoretically mapped in the LPIS in the two areas. For the Tarn area, we identified 21 330 crop sequences, which were grouped into 22 sequence types (Table 3) based on 18 crop classes, 14 of which can be irrigated (Table 4). For the Adour area, LPIS analysis identified 7 163 crop sequences, which were grouped into 18 sequence types (Table 5) based on 14 crop classes, 11 of which can be irrigated (Table 6). Figure 3 and Table 7 report the percentages and location factors used to determine the “new” crop classes in both areas, i.e. those different from the original LPIS. The original LPIS “maize” class was first divided into silage maize and grain maize according to a decision tree based on the percentages of maize and pasture area in the farm agricultural area (Table 7). Next, the grain maize class was divided into two classes of earliness depending on the crop sequence and the soil in the land parcel (Fig. 3). The “other cereals” and “orchards” LPIS classes were also divided into new classes according to crop sequence and soil type location factors. For example, in the Tarn area, kiwifruit orchards were randomly located on 25% of the land parcels grown continuously in orchards (according to LPIS) and situated on alluvial soils.

**Table 3.** Crop sequence types for the Tarn area (first column). Each sequence is described by the simplified crop classes in it (in no specific order), its duration (each crop representing one year), and the frequency with which each crop occurs. For example, “Maize, rot” is a 6-year sequence with maize in 3 out of 6 years, soybean, wheat and another cereal. For monocropping (mc) and perennial production, the crop is only listed in the second column. Note that crops in a sequence that can be irrigated or rainfed are managed differently. Cer = cereal, rot = rotation

Sequence type	Sequence						
	Crop 1	Crop 2	Crop 3	Crop 4	Crop 5	Crop 6	Crop 7
<b>IRRIGATED</b>							
Maize, mc	Maize						
Maize, rot	Maize	Maize	Maize	Soybean	Wheat	Other cer	
Cer - Soybean	Wheat	Other cer	Soybean				
Cer	Wheat	Other cer					
Alfalfa - Maize	Alfalfa	Alfalfa	Alfalfa	Maize			
Seed production, mc	Seeds						
Seed production, rot	Seeds	Seeds	Wheat	Other cer			
Vegetables	Vegetables						
Orchards	Orchards						
<b>RAINFED</b>							
Maize, rot	Maize	Maize	Maize	Soybean	Wheat	Other cer	Small grains
Cereals - Soybean	Wheat	Other cer	Small grains	Soybean			
Cereals	Wheat	Other cer	Small grains				
Cer - Sunflower	Wheat	Other cer	Small grains	Sunflower			
Cer - Rapeseed	Wheat	Other cer	Small grains	Rapeseed			
Vegetables	Vegetables						
Set-aside	Set-aside						
Alfalfa - Cereals	Alfalfa	Alfalfa	Alfalfa	Small grain			
Alfalfa - Maize	Alfalfa	Alfalfa	Alfalfa	Maize			
Mix	Small grain	Pea	Sunflower	Soybean	Seeds	Alfalfa	Set-aside
Grassland	Grassland						
Orchards	Orchards						
Vineyards	Vineyards						

**Table 4.** Definition of the crop classes at the regional scale in the Tarn area. Crop classes are irrigated (\*\*), seldom irrigated (\*) and exclusively rainfed (°). Absent crops were removed. LPIS = Land Parcel Identification System.

Area (ha) (2012)	LPIS label	Intermediate classes	Simulated crop classes
11 283	Grain and silage maize	Early varieties Late varieties Silage	Maize Early var. ** Maize Late var. ** Silage maize**
3 128	Seed production	Seed production	Seed production **
26 836	Common wheat	Winter wheat	Winter wheat •
15 652	Other cereals	Durum wheat Sorghum Small grains	Sorghum • Small grains °
10 238	Barley	Small grains	
116	Other industrial crops		
4 336	Rapeseed	Rapeseed	Rapeseed •
18 590	Sunflower	Sunflower	Sunflower •
1 807	Other oil crops	Soybean	Soybean **
666	Protein crops	Spring pea	Spring pea **
275	Grain legumes		
0	Fiber crops		
0	Set-aside		
0	Fixed fallows (except for industrial use)	Set-aside	Set-aside °
6 403	Other fallows		
2 254	Various		
723	Moors	Pastures	Pastures °
20 158	Pastures		
1 501	Fodder crops	Alfalfa	Alfalfa •
25 964	Sown pastures		
867	Vegetables – flowers	Vegetables	Vegetables **
2 711	Orchards	Kiwifruit orchards Other orchards	Kiwifruit orchards ** Other orchards **
246	Nut trees		
1	Olive groves	Other orchards	
20	Nurseries		
5 473	Vineyards	Vineyards	Vineyards °

**Table 5.** Crop sequence types for the Adour area (first column). Each sequence is described by the simplified crop classes in it (in no specific order), its duration (each crop representing one year), and the frequency with which each crop occurs. For example, “Maize, rot” is a 5-year sequence with maize in 3 out of 5 years, soybean and a small grain crop. For monocropping (mc) and perennial production, the crop is only listed in the second column (Crop 1). Cer = small grains, rot = rotation.

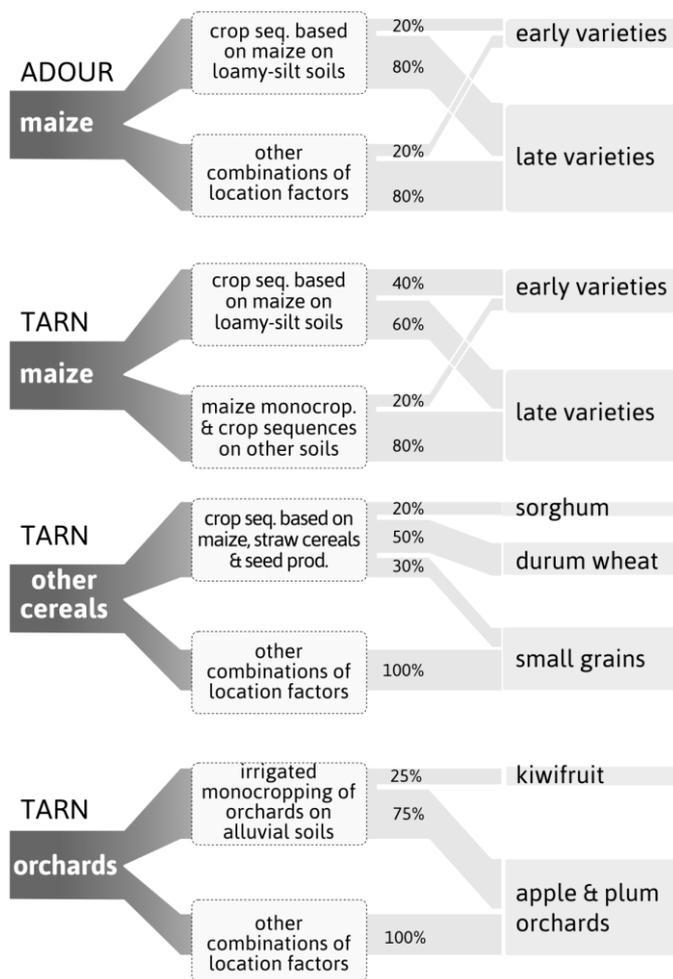
Sequence type	Sequence					
	Crop 1	Crop 2	Crop 3	Crop 4	Crop 5	Crop 6
IRRIGATED						
Maize, mc	Maize					
Maize, rot	Maize	Maize	Maize	Soybean	Small grains	
Alfalfa - Maize	Alfalfa	Alfalfa	Alfalfa	Maize		
Seed production, mc	Seeds					
Seed production, rot	Seeds	Seeds	Small grains			
String beans	String beans					
Orchards	Orchards					
RAINFED						
Maize, rot	Maize	Maize	Maize	Soybean	Small grains	
Cer	Small grains					
Cer - Sunflower	Small grains	Sunflower				
Cer - Rapeseed	Small grains	Rapeseed				
Set-aside	Set-aside					
Alfalfa - Cer	Alfalfa	Alfalfa	Alfalfa	Small grains		
Alfalfa - Maize	Alfalfa	Alfalfa	Alfalfa	Maize		
Mix	Sunflower	Soybean	Seeds	Alfalfa	Grassland	Set-aside
Grassland	Grassland					
Orchards	Orchards					
Vineyards	Vineyards					

**Table 6.** Definition of the crop classes at the regional scale in the Adour area. Crop classes are irrigated (\*\*), seldom irrigated (\*), or exclusively rainfed (°). Absent crops were removed. LPIS = Land Parcel Identification System.

Area (ha) (2012)	LPIS label	Simulated crop classes
32 070	Grain and silage maize	Maize Early var. ** Maize Late var. ** Silage maize **
3 574	Common wheat	Small grains •
690	Barley	
996	Other cereals	
12	Other industrial crops	
133	Protein crops	Soybean **
7	Grain legumes	
375	Other oil crops	
487	Vegetables – flowers	String beans **
32	Orchards	Orchards **
7	Nut trees	
0	Olive groves	
3	Nurseries	
1 307	Rapeseed	Rapeseed •
1 944	Seed production	Seed production **
1 196	Sunflower	Sunflower •
194	Fodder crops	Alfalfa •
6 765	Sown pastures	
12 514	Moors	Pastures °
11 422	Pastures	
0	Fiber crops	Set-aside °
0	Set-aside	
0	Fixed fallows (except for industrial use)	
2 723	Other fallows	
916	Various	
1 924	Vineyard	Vineyards °

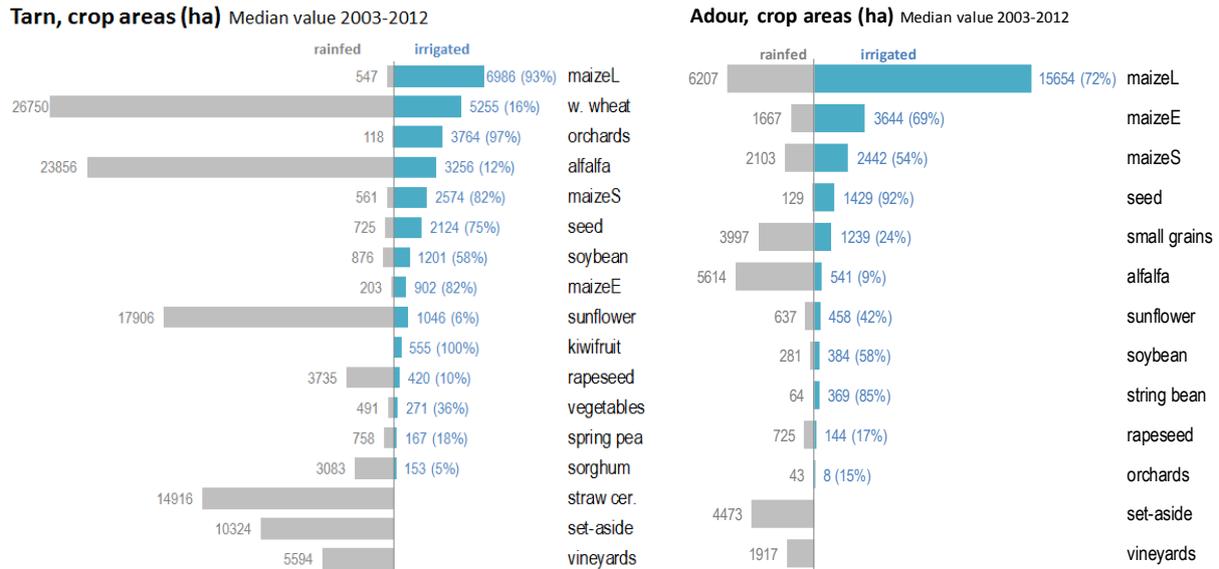
**Table 7.** Distribution of the LPIS maize class into grain and silage classes based on location factors (percentages of maize and pasture in the farm area). This model was used for both the Tarn and Adour areas.

Location factors		Distribution of the LPIS maize class into grain and silage classes	
% of maize in farm agricultural area	% of pasture in farm agricultural area	Grain maize	Silage maize
< 30%	–	75%	25%
>30%	< 10%	100%	0%
	10-35%	50%	50%
	> 35%	100%	0%



**Figure 3.** Procedure used to develop new crop classes from original LPIS classes, as specified in step 2 of the key informant approach. The diagram presents the original LPIS class (col. 1), the location factors (col. 2) and percentages (col. 3) used to divide LPIS classes, and possibly recombine them, into new crop classes (col. 4). Here, "maize" is only grain maize.

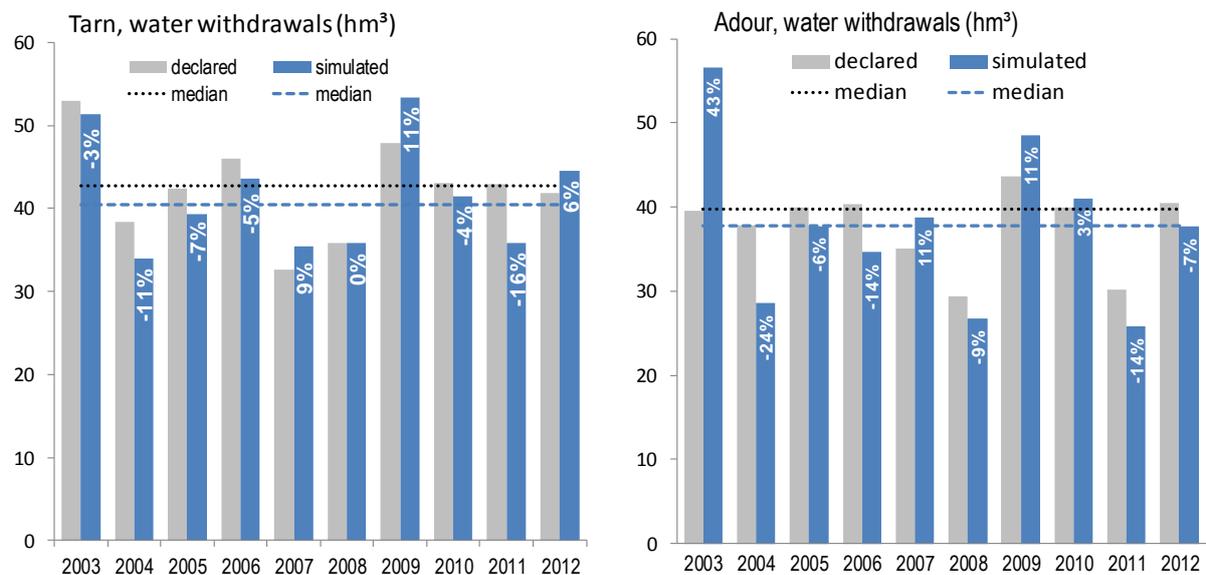
Based on the irrigated and rainfed areas of each crop derived from LPIS irrigation data for 2007-2009 (Fig. 4), maize was the most extensively irrigated crop in both areas. For the Adour area, we estimated that ≈70% of maize area was irrigated, whereas the key informants estimated that 75% was irrigated. For the Tarn area, we estimated that 93% and 82% of late and early maize varieties, respectively, were irrigated, whereas the key informants estimated that 100% of each was irrigated (Fig. 4). As for location factors of cropping systems, the key informants mainly emphasized soil water-holding capacity (i.e., the greater the clay content, the higher and less frequent the irrigation) and irrigation equipment (e.g., pivot irrigation has lower doses and higher frequency than sprinkler irrigation).



**Fig. 4.** Median rainfed and irrigated crop areas (ha) for the period simulated (2003-2012) in the two study areas. Values in parentheses indicate the percentage of total crop area that was irrigated. Maize is divided into silage (maizeS), early (maizeE) and late (maizeL) varieties, in addition of seed productions. Winter cereals include winter wheat (w. wheat) in the Tarn and small grains in the Adour.

### 3.3 Simulated water withdrawals at the regional scale

Median annual withdrawals for 2003-2012 reported by AEAG were 39.7 and 42.7 hm<sup>3</sup> for the Adour and Tarn areas, respectively, while MAELIA predicted 37.7 and 40.4 hm<sup>3</sup> (Fig. 5), respectively (underpredicted by 5%). The model simulated well withdrawal dynamics among years (Fig. 5). Predictions for the Tarn area ranged from 16% below (in 2011) to 11% above (in 2009) observations. Predictions were less accurate for the Adour area, especially for 2003-2005; for 2006-2012, they ranged from 14% below to 11% above observations. Less accurate predictions in the Adour area for 2003-2005 may have been influenced by the lack of LPIS crop data before 2006 and by the quality of the AEAG data for withdrawn volumes. Notably, AEAG data for the Adour area in the earlier years were mostly estimates based on farm irrigated area, while those in the later years were mostly measurements. This factor could be the most important, since the AEAG obtained measured withdrawals from an earlier date in the Tarn area, for which predictions were more accurate.



**Fig. 5.** Comparison of water withdrawals for irrigation declared to the water agency by irrigating farmers and predicted by the agricultural module of the MAELIA platform.

## 4. Discussion

In this article, we present a method to describe spatial distribution of current cropping systems at the regional scale. Similar approaches for the same objective, based on a few local key informants, were used to describe the influence of agriculture on landscape management (Galli et al. 2010) and to identify strengths and weaknesses of extension services (Debolini et al. 2013). The discussion below is structured around four points: (i) strengths of the method, (ii) how to evaluate it, (iii) difficulties encountered when applying it and (iv) its replicability and genericity.

**Strengths.** We collected the necessary information about cropping systems at the regional scale from a few key informants. French extension services are generally organized to operate with relatively few agents, which facilitated extensive coverage of the study areas with only a few interviews. The two managers' extensive knowledge of the region was crucial in helping us identify relevant key informants. We assumed that extension agents would have a wide view of crop management systems and could identify average decision rules and potential local and individual adaptations. They helped us describe cropping systems reliably in the two study areas. When evaluating this approach indirectly with MAELIA's agricultural module, we observed results similar to those of the previous study in the nearby Aveyron watershed (Murgue et al. 2014). Our approach, using local knowledge of key informants to formalize location and crop management rules, performs as well as the previous approach and is more efficient, since using farmers' knowledge requires much more time (approximately 6 months for 27 detailed interviews plus processing time and additional interactions with local experts, Murgue et al. 2016)). In summary, the key informant approach enabled us to describe crop management systems at the regional scale in about 260 hours for the two case studies, approximately one-fourth of the time in the previous study. This efficiency allowed us to simulate cropping systems on six times as many fields as in the Aveyron study. Another strength of our approach lies in the key informants, who have an integrative vision of the study area that is less biased than the perceptions of individuals (e.g. farmers) sampled in the more classic approach.

**Evaluation.** Due to the lack of independent data on observed farmers' practices, we evaluated our approach indirectly using a model to simulate water withdrawals, which can provide suggestions for improvement. Future evaluations could be performed when more reliable water use data becomes available; however, little availability of reliable data is a major obstacle in evaluating model outputs, as often reported for model evaluation at the regional scale (e.g., Leenhardt et al. 2016; 2004; Temme and Verburg 2011; Waldner et al. 2015a). We used water withdrawals collected by the AEAG; however, its database still has some weaknesses in spatial coverage, locations of withdrawal points and how withdrawn volumes were surveyed over time, which partly explains differences between observed and predicted water withdrawals. Differences were also likely due to underestimates of irrigation of orchards and vegetables, particularly in the Tarn area, because the soil-crop model in MAELIA was not sufficiently parameterized to represent these two crops correctly. Finally, we focused our evaluation on irrigation practices; for more complete evaluation, one should also evaluate the accuracy of the other practices simulated, such as sowing or harvest. For example, one could sum, for each crop, the temporal distribution of the corresponding technical operations for each combination of [crop sequence type] × [soil] × [irrigation equipment] into diagrams similar to those used during the interviews (Fig. 2) and present them to farmers and other experts for validation.

**Limits and difficulties.** The key informants had different levels of experience in local crop management practices. They ranged from a highly experienced extension agent, who had worked in the same area for approximately 20 years, to a recently recruited agent. In general, the longer their experience in local farming, the greater their ability to describe crop management decision rules at the regional scale, though their answers appeared to be adapted to average pedo-climatic conditions. Conversely, the shorter their experience, the more they tended to refer to extension service bulletins, i.e. recommendations instead of actual practices. The key informants with less experience tended to provide detailed descriptions of farmers' decision rules, though it was limited to the most recent years. Ultimately, we had to find a balance between the reliable experience of the former and the high detail of the latter. Another difficulty was collecting and processing information

in study areas with many irrigated crops, regardless of their extents. The Adour area was easier to process because maize was nearly the only irrigated crop and was responsible for the most water withdrawals. In the Tarn area, it took longer to process because it had more irrigated crops (i.e. maize, seed production, kiwifruit and other orchards) influencing water use at the regional scale. One limit of our approach was the simplified description of certain crops. Because we focused on irrigation, we simplified description of rainfed crops and ignored or simplified irrigated crops covering small areas. For example, we assumed that a class of maize could represent many seed production crops in the Tarn area, since maize is the predominant seed crop.

The underestimates of simulated water withdrawals revealed weaknesses in our approach, particularly the way we mapped irrigation status. First, we used 2007-2009 LPIS data to determine whether land parcels could be irrigated, which might have biased estimates of irrigation status before and after this period. In this perspective, it would be reasonable to update these data using specific sources, such as recent multi-sensor, high-resolution time series of satellite images being evaluated for identifying irrigated crops in our study region (Waldner et al. 2015b). Second, information about relative frequencies and distribution of types of irrigation equipment, which can strongly influence irrigation volume per ha, was lacking. Discussions with irrigation experts indicate that the increasing use of pivot irrigation tends to increase irrigation intensity. Therefore, more detailed information is needed to evaluate potential effects of these two sources of errors, and, if necessary, methods to obtain irrigation equipment information could be developed.

**Replicability and genericity.** Our approach of describing cropping systems at the regional scale was applied to the Tarn and Adour watersheds in response to specific irrigation issues. However, the approach has a generic character. First, it uses data that is relevant beyond these two study areas. The LPIS database, from which we obtained descriptions of crop sequences, is increasingly used to map crop patterns and dynamics in France (Bouty et al. 2015; Durpoix and Barataud 2014; Levavasseur et al. 2016; Rizzo et al. 2014) and elsewhere in Europe (Leteinturier et al. 2006; Levin 2013; Zimmermann et al. 2016). Second, the local information was integrated using intermediate objects (e.g., diagrams) and then formalized as IF-THEN rules for management decisions and cropping system location. Combining diagrams and IF-THEN rules defined a methodological framework that can be adapted easily to study other areas and crop management practices besides irrigation, as well as to account for various annual and perennial crops. We found that the documents prepared for the interviews (scripts and diagrams) could be adapted rapidly from the first area (Tarn) to the second (Adour), demonstrating their genericity. Formalizing the knowledge that underpins the intermediate objects used for key informant interviews may eventually facilitate social learning among farmers, extension agents and scientists, at least by providing focal points for communication and bridging gaps among them (Houllier and Merilhou-Goudard 2016; Jakku and Thorburn 2010; Moonen et al. 2016). More generally, we assume the key informant approach can be repeated anywhere, though its main limitation, as in other participatory approaches, is the difficulty in identifying the best key informants. One way to evaluate their representativeness is by characterizing the local web of actors and the socio-technical system (Mathevet et al. 2014). We limited our key informant approach to extension agents, but other local actors have knowledge about crop management practices that complements farmers' knowledge. During the interviews, managers of local water-user associations, who are also farmers, or extension agents working for private or crop-specific technical institutes, were often mentioned as able to provide relevant knowledge to describe cropping systems and irrigation practices at the regional scale.

## 5. Conclusions

Representing agricultural practices at the regional scale requires integrating existing and accessible generic data by formalizing local expert knowledge. We evaluated whether the key informant approach can reliably describe cropping systems at the regional scale and decrease data collection time compared to that of a previous study (Murgue et al. 2016). Compared to this previous study, based on 27 farmer interviews (and several focus groups), our approach involved only 12

interviewees and took one-fourth as much time to collect and process the relevant information. The gain in efficiency was even greater because our study areas were a total of six times as large as that in the previous study. Implementing the key informant approach allowed us to model irrigation decisions and their spatial distributions and, through dynamic simulations, predict annual amounts and interannual dynamics of irrigation water withdrawals relatively well. One main innovation of our method was to use knowledge from generic databases when interacting with key informants and ad-hoc intermediate objects to help them focus on missing information. In particular, use of diagrams reduced interview duration and processing time. Furthermore, these supports are easy to reuse in new study areas. Overall, the approach was applied to a large areas and easily adapted to other areas, thus providing a rapid and inexpensive tool to inform decisions and policy making at the regional scale. Although we focused on irrigation management practices in areas with water scarcity issues, this approach is sufficiently generic to be applied to areas where LPIS data are available, and can be easily adapted to focus on other management practices and crops. Combining available databases and local knowledge and transforming them into intermediate objects for key informant interviews is an effective way to address agri-environmental issues that require modeling of the spatial distribution of cropping systems at the regional scale.

## Acknowledgments

The authors thank the interviewees from the extension services and the other local experts who generously contributed to the description and formalization of cropping systems for the Tarn and Adour areas. We also acknowledge the members of the CASDAR SIMULTEAU project for their useful comments and improvements on the method. Finally, we thank Pierre Casel and Denis Baudet (INRA UMR AGIR) for their help in retrieving and processing the LPIS and geographic data.

## References

- AEAG (2015) Agence de l'Eau Adour-Garonne. Système d'information sur l'eau du Bassin Adour-Garonne. Droits de reproduction réservés et strictement limités. <http://adour-garonne.eaufrance.fr/>. Accessed 12 Feb 2016
- Agreste (2010) RGA - Recensement Général Agricole (general agricultural census).
- Antoni V, Saby N, Jolivet C, et al. (2007) The French information system on soils: a decision support system for soil inventory, monitoring and management. *Environ. Inform. Syst. Res. Warsaw (POL)*, pp 255–262
- Aouadi N, Aubertot JN, Caneill J, Munier-Jolain N (2015) Analyzing the impact of the farming context and environmental factors on cropping systems: A regional case study in Burgundy. *Eur J Agron* 66:21–29. doi: 10.1016/j.eja.2015.02.006
- ASP (2012) Agence de Service et de Paiement [Agency for Service and Payment]. Registre parcellaire graphique anonyme [French Anonymous Land Parcel Identification System]. <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-parcellaire-graphique-2012-contours-des-ilots-cultureaux-et-leur-groupe-de-cultures-majorita/>.
- Aubry C, Papy F, Capillon A (1998) Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agric Syst* 56:45–65. doi: 16/S0308-521X(97)00034-6
- Bailly JS, Biarnès A, Lagacherie P (2010) Semi-virtual spatial simulations of land management practices in Languedoc Vineyards: a way to deal with incomplete knowledges of spatial distributions in cultivated landscapes.
- Bégué A, Arvor D, Lelong C, et al. (2015) *Agricultural Systems Studies Using Remote Sensing*. In: Prasad ST (ed) *Land Resour. Monit. Model. Mapp. Remote Sens.* CRC Press, pp 113–130
- Benoît M, Rizzo D, Marraccini E, et al. (2012) Landscape agronomy: a new field for addressing agricultural landscape dynamics. *Landsc Ecol* 27:1385–1394. doi: 10.1007/s10980-012-9802-8
- Bergez J-E, Debaeke P, Deumier J-M, et al. (2001) MODERATO: an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecol Model* 137:43–60. doi: 10.1016/S0304-3800(00)00431-2
- Biarnès A, Bailly J, Boissieux Y (2009) Identifying indicators of the spatial variation of agricultural practices by a tree partitioning method: The case of weed control practices in a vine growing catchment. *Agric Syst* 99:105–116. doi: 10.1016/j.agsy.2008.10.002

- Boiffin J, Benoît M, Le Bail M, et al. (2014) Agronomie, espace, territoire : travailler « pour et sur » le développement territorial, un enjeu pour l'agronomie. *Cah Agric* 23:72–83. doi: 10.1684/agr.2014.0688
- Bouty C, Levavasseur F, Martin P, Barbottin A (2015) Are crop sequence evolutions influenced by farm territory dynamics? Montpellier, France, p poster
- Buller H (2009) The lively process of interdisciplinarity. *Area* 41:395–403. doi: 10.1111/j.1475-4762.2008.00856.x
- Clavel L, Charron M-H, Therond O, Leenhardt D (2012) A Modelling Solution for Developing and Evaluating Agricultural Land-Use Scenarios in Water Scarcity Contexts. *Water Resour Manag*. doi: 10.1007/s11269-012-0037-x
- Clavel L, Soudais J, Baudet D, Leenhardt D (2011) Integrating expert knowledge and quantitative information for mapping cropping systems. *Land Use Policy* 28:57–65. doi: 16/j.landusepol.2010.05.001
- Constantin J, Willaume M, Murgue C, et al. (2015) The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. *Agric For Meteorol* 206:55–68. doi: 10.1016/j.agrformet.2015.02.011
- Debolini M, Marraccini E, Rizzo D, et al. (2013) Mapping local spatial knowledge in the assessment of agricultural systems: A case study on the provision of agricultural services. *Appl Geogr* 42:23–33. doi: 10.1016/j.apgeog.2013.04.006
- Debril T, Therond O (2012) 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. *Agron Environ Sociétés* 2:127–137.
- Deffontaines J-P (1973) Analyse du paysage et étude régionale des systèmes de production agricole. *Économie Rurale* 98:3–13. doi: 10.3406/ecoru.1973.2232
- Dice LR (1945) Measures of the Amount of Ecologic Association Between Species. *Ecology* 26:297–302. doi: 10.2307/1932409
- Dupas R, Parnaudeau V, Reau R, et al. (2015) Integrating local knowledge and biophysical modeling to assess nitrate losses from cropping systems in drinking water protection areas. *Environ Model Softw* 69:101–110. doi: 10.1016/j.envsoft.2015.03.009
- Durpoix A, Barataud F (2014) Intérêts de l'analyse territorialisée des parcelles des exploitations agricoles concernées par une aire d'alimentation de captage. *Sci Eaux Territ hors-séries*:2–6.
- Duru M, Therond O, Fares M (2015) Designing agroecological transitions; A review. *Agron Sustain Dev* 1–21. doi: 10.1007/s13593-015-0318-x
- EEA (2015) European Environment Agency. CLC 2012 v.18.4. In: Copernic. Land Monit. Serv. <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012/view>. Accessed 12 Feb 2016
- European Environment Agency E (2012) Territorial cohesion and water management in Europe: the spatial perspective. 82.
- Eurostat (2015) Regions in the European Union - Nomenclature of territorial units for statistics - NUTS 2013/EU-28. 144.
- Fuchs R, Herold M, Verburg PH, Clevers JGPW (2013) A high-resolution and harmonized model approach for reconstructing and analysing historic land changes in Europe. *Biogeosciences* 10:1543–1559. doi: 10.5194/bg-10-1543-2013
- Galli M, Bonari E, Marraccini E, Debolini M (2010) Characterisation of Agri-Landscape Systems at a Regional Level: A Case Study in Northern Tuscany. *Ital J Agron* 5:285–294.
- Gaudou B, Sibertin-Blanc C, Therond O, et al. (2013) The MAELIA multi-agent platform for integrated assessment of low-water management issues. pp 85–110
- Glavan M, Pintar M, Urbanc J (2015) Spatial variation of crop rotations and their impacts on provisioning ecosystem services on the river Drava alluvial plain. *Sustain Water Qual Ecol* 5:31–48. doi: 10.1016/j.swaqe.2015.01.004
- Hipolito J (2012) Distribution spatiale et caractérisation des systèmes de culture dans le territoire irrigué à l'aval de la rivière Aveyron. M. Sc., SupAgro, Montpellier (FRA)
- Houet T, Loveland TR, Hubert-Moy L, et al. (2010) Exploring subtle land use and land cover changes: a framework for future landscape studies. *Landsc Ecol* 25:249–266. doi: 10.1007/s10980-009-9362-8
- 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. *Int J Geogr Inf Sci* 0:1–29. doi: 10.1080/13658816.2014.900775
- Houllier F, Merilhou-Goudard J-B (2016) Les sciences participatives en France. INRA
- Hutchings NJ, Reinds GJ, Leip A, et al. (2012) A model for simulating the timelines of field operations at a European scale for use in complex dynamic models. *Biogeosciences* 9:4487–4496. doi: 10.5194/bg-9-4487-2012
- Jahel C, Baron C, Vall E, et al. (2016) Spatial modelling of agro-ecosystem dynamics across scales: A case in the cotton region of West-Burkina Faso. *Agric Syst*. doi: 10.1016/j.agsy.2016.05.016

- Jakku E, Thorburn PJ (2010) A conceptual framework for guiding the participatory development of agricultural decision support systems. *Agric Syst* 103:675–682. doi: 10.1016/j.agsy.2010.08.007
- Joannon A, Souchère V, Martin P, Papy F (2006) Reducing runoff by managing crop location at the catchment level, considering agronomic constraints at farm level. *Land Degrad Dev* 17:467–478. doi: 10.1002/ldr.714
- King D, Stengel P, Jamagne M, et al. (2005) Soil Mapping and Soil Monitoring: State of Progress and Use in France. *Soil Resour. Eur. Second Ed. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg*, pp 139–146
- Kollas C, Kersebaum KC, Nendel C, et al. (2015) Crop rotation modelling—A European model intercomparison. *Eur J Agron* 70:98–111. doi: 10.1016/j.eja.2015.06.007
- Kuemmerle T, Erb K, Meyfroidt P, et al. (2013) Challenges and opportunities in mapping land use intensity globally. *Curr Opin Environ Sustain.* doi: 10.1016/j.cosust.2013.06.002
- Leenhardt D, Angevin F, Biarnès A, et al. (2010) Describing and locating cropping systems on a regional scale. A review. *Agron Sustain Dev* 30:131–138. doi: 10.1051/agro/2009002
- Leenhardt D, Maton L, Bergez J-E (2016) Simulating farming practices within a region using a stochastic bio-decisional model: Application to irrigated maize in south-western France. *Eur J Agron* 75:139–148. doi: 10.1016/j.eja.2016.01.013
- Leenhardt D, Therond O, Mignolet C (2012) Quelle représentation des systèmes de culture pour la gestion de l'eau sur un grand territoire ? *Agron Environ Sociétés* 2:77–89.
- Leenhardt D, Trouvat J-L, Gonzalès G, et al. (2004) Estimating irrigation demand for water management on a regional scale: I. ADEAUMIS, a simulation platform based on bio-decisional modelling and spatial information. *Agric Water Manag* 68:207–232. doi: 10.1016/j.agwat.2004.04.004
- Leteinturier B, Herman JL, Longueville F de, et al. (2006) Adaptation of a crop sequence indicator based on a land parcel management system. *Agric Ecosyst Environ* 112:324–334. doi: 10.1016/j.agee.2005.07.011
- Levasseur F, Martin P, Bouty C, et al. (2016) RPG Explorer: A new tool to ease the analysis of agricultural landscape dynamics with the Land Parcel Identification System. *Comput Electron Agric* 127:541–552. doi: 10.1016/j.compag.2016.07.015
- Levin G (2013) Applying parcel-specific land-use data for improved monitoring of semi-natural grassland in Denmark. *Environ Monit Assess* 185:2615–2625. doi: 10.1007/s10661-012-2735-5
- Lovell ST, DeSantis S 'ra, Nathan CA, et al. (2010) Integrating agroecology and landscape multifunctionality in Vermont: An evolving framework to evaluate the design of agroecosystems. *Agric Syst* 103:327–341. doi: 10.1016/j.agsy.2010.03.003
- Macé K, Morlon P, Munier-Jolain N, Quéré L (2007) Time scales as a factor in decision-making by French farmers on weed management in annual crops. *Agric Syst* 93:115–142. doi: 10.1016/j.agsy.2006.04.007
- Marie M, Bermond M, Gouée PL, Delahaye D (2008) Intérêts et limites des statistiques agricoles pour l'étude des structures spatiales produites par l'agriculture en Basse-Normandie. *Norois Environ Aménage Société* 21–33. doi: 10.4000/norois.1954
- Martínez-Casasnovas JA, Martín-Montero A, Auxiliadora Casterad M (2005) Mapping multi-year cropping patterns in small irrigation districts from time-series analysis of Landsat TM images. *Eur J Agron* 23:159–169. doi: 10.1016/j.eja.2004.11.004
- Mathevet R, Antona M, Barnaud C, et al. (2014) Contexts and dependencies in the ComMod processes. *Companion Model. Springer*, pp 103–125
- Maton L, Bergez J-E, Leenhardt D (2007) Modelling the days which are agronomically suitable for sowing maize. *Eur J Agron* 27:123–129. doi: 10.1016/j.eja.2007.02.007
- Mazzega P, Therond O, Debril T, et al. (2014) Critical multi-level governance issues of integrated modelling: An example of low-water management in the Adour-Garonne basin (France). *J Hydrol* 519, Part C:2515–2526. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.043
- McCown RL (2012) A cognitive systems framework to inform delivery of analytic support for farmers' intuitive management under seasonal climatic variability. *Agric Syst* 105:7–20. doi: 10.1016/j.agsy.2011.08.005
- Mignolet C, Schott C, Benoît M (2007) Spatial dynamics of farming practices in the Seine basin: Methods for agronomic approaches on a regional scale. *Sci Total Environ* 375:13–32.
- Moonen AC, Lardon S, Marraccini E, et al. (2016) From Action Research to Action Learning – Ecosystem services assessment as a learning platform for students, local land users and researchers. In: Wilcox A, Vinnall S (eds) *Soc. Technol. Transform. Farming Syst. - Diverging Converging Pathw.* Harper Adam University, UK, p 8
- Moss MR (2000) Interdisciplinarity, landscape ecology and the Transformation of Agricultural Landscapes'. *Landsc Ecol* 15:303–311. doi: 10.1023/A:1008144402408
- Murgue C, Lardy R, Vavasseur M, et al. (2014) Fine spatio-temporal simulation of cropping and farming systems effects on irrigation withdrawal dynamics within a river basin.

- Murgue C, Therond O, Leenhardt D (2015) Toward integrated water and agricultural land management: Participatory design of agricultural landscapes. *Land Use Policy* 45:52–63. doi: 10.1016/j.landusepol.2015.01.011
- Murgue C, Therond O, Leenhardt D (2016) Hybridizing local and generic information to model cropping system spatial distribution in an agricultural landscape. *Land Use Policy* 54:339–354. doi: 10.1016/j.landusepol.2016.02.020
- Murgue C, Therond O, Leenhardt D (under review) Hybridizing local and generic information to model cropping system spatial distribution in an agricultural landscape. *Land Use Policy*
- Nesme T, Bellon S, Lescourret F, et al. (2005) Are agronomic models useful for studying farmers' fertilisation practices? *Agric Syst* 83:297–314. doi: 10.1016/j.agry.2004.05.001
- Nesme T, Lescourret F, Bellon S, Habib R (2010) Is the plot concept an obstacle in agricultural sciences? A review focussing on fruit production. *Agric Ecosyst Environ* 138:133–138. doi: 10.1016/j.agee.2010.04.014
- OEBA (2015) Observatoire de l'Eau du Bassin de l'Adour - L'irrigation dans le bassin de l'Adour [Irrigation in the Adour basin]. Synthèse 2015.
- O'Keeffe J, Buytaert W, Mijic A, et al. (2015) The use of semi-structured interviews for the characterisation of farmer irrigation practices. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss* 12:8221–8246. doi: 10.5194/hessd-12-8221-2015
- Oliver YM, Robertson MJ, Wong MTF (2010) Integrating farmer knowledge, precision agriculture tools, and crop simulation modelling to evaluate management options for poor-performing patches in cropping fields. *Eur J Agron* 32:40–50. doi: 10.1016/j.eja.2009.05.002
- Ramankutty N, Foley JA, Norman J, McSweeney K (2002) The global distribution of cultivable lands: current patterns and sensitivity to possible climate change. *Glob Ecol Biogeogr* 11:377–392. doi: 10.1046/j.1466-822x.2002.00294.x
- Ray DK, Ramankutty N, Mueller ND, et al. (2012) Recent patterns of crop yield growth and stagnation. *Nat Commun* 3:1293. doi: 10.1038/ncomms2296
- Rizzo D, Marraccini E, Lardon S, et al. (2013) Farming systems designing landscapes: land management units at the interface between agronomy and geography. *Geogr Tidsskr-Dan J Geogr* 113:71–86. doi: 10.1080/00167223.2013.849391
- Rizzo D, Martin L, Wohlfahrt J (2014) *Miscanthus* spatial location as seen by farmers: A machine learning approach to model real criteria. *Biomass Bioenergy* 66:348–363. doi: 10.1016/j.biombioe.2014.02.035
- Rounsevell MDA, Arneth A (2011) Representing human behaviour and decisional processes in land system models as an integral component of the earth system. *Glob Environ Change* 21:840–843. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2011.04.010
- Rounsevell MDA, Pedrolì B, Erb K-H, et al. (2012) Challenges for land system science. *Land Use Policy* 29:899–910. doi: 10.1016/j.landusepol.2012.01.007
- Ruiz-Martinez I, Marraccini E, Debolini M, Bonari E (2015) Indicators of agricultural intensity and intensification: a review of the literature. *Ital J Agron* 10:74. doi: 10.4081/ija.2015.656
- Sagris V (2013) Land Parcel Identification System conceptual model: development of geoinfo community conceptual model. PhD thesis, University of Tartu (Estonia)
- Sahajpal R, Zhang X, Izaurralde RC, et al. (2014) Identifying representative crop rotation patterns and grassland loss in the US Western Corn Belt. *Comput Electron Agric* 108:173–182. doi: 10.1016/j.compag.2014.08.005
- Sarangi A, Madramootoo CA, Cox C (2004) A decision support system for soil and water conservation measures on agricultural watersheds. *Land Degrad Dev* 15:49–63. doi: 10.1002/ldr.589
- Schaller N, Lazrak EG, Martin P, et al. (2012) Combining farmers' decision rules and landscape stochastic regularities for landscape modelling. *Landsc Ecol* 27:433–446. doi: 10.1007/s10980-011-9691-2
- Scherr SJ, McNeely JA (2008) Biodiversity conservation and agricultural sustainability: towards a new paradigm of "ecoagriculture" landscapes. *Philos Trans R Soc B Biol Sci* 363:477–494. doi: 10.1098/rstb.2007.2165
- Sebillotte M (1990) Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. *Systèmes Cult* 165–196.
- Steinmann HH, Dobers ES (2013) Spatio-temporal analysis of crop rotations and crop sequence patterns in Northern Germany: potential implications on plant health and crop protection. *J Plant Dis Prot JPDP* 120:85–94.
- Teillard F, Allaire G, Cahuzac E, et al. (2012) A novel method for mapping agricultural intensity reveals its spatial aggregation: Implications for conservation policies. *Agric Ecosyst Environ* 149:135–143. doi: 10.1016/j.agee.2011.12.018
- Temme AJAM, Verburg PH (2011) Mapping and modelling of changes in agricultural intensity in Europe. *Agric Ecosyst Environ* 140:46–56. doi: 10.1016/j.agee.2010.11.010

- Thenail C, Joannon A, Capitaine M, et al. (2009) The contribution of crop-rotation organization in farms to crop-mosaic patterning at local landscape scales. *Agric Ecosyst Environ* 131:207–219. doi: 10.1016/j.agee.2009.01.015
- Therond O, Belhouchette H, Janssen S, et al. (2009) Methodology to translate policy assessment problems into scenarios: the example of the SEAMLESS integrated framework. *Environ Sci Policy* 12:619–630. doi: 10.1016/j.envsci.2009.01.013
- Therond O, Hengsdijk H, Casellas E, et al. (2011) Using a cropping system model at regional scale: Low-data approaches for crop management information and model calibration. *Agric Ecosyst Environ* 142:85–94. doi: 10.1016/j.agee.2010.05.007
- Therond O, Sibertin-Blanc C, Lardy R, et al. (2014) Integrated modelling of social-ecological systems: The MAELIA high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems.
- Toffolini Q, Jeuffroy M-H, Prost L (2015) Indicators used by farmers to design agricultural systems: a survey. *Agron Sustain Dev* 36:1–14. doi: 10.1007/s13593-015-0340-z
- Tremblay M-A (1957) The Key Informant Technique: A Nonethnographic Application. *Am Anthropol* 59:688–701. doi: 10.1525/aa.1957.59.4.02a00100
- Tress G, Tress B, Bloemmen MHI (2003) From tacit to explicit knowledge in integrative and participatory research. WUR-Alterra
- Verburg PH, Neumann K, Nol L (2011) Challenges in using land use and land cover data for global change studies. *Glob Change Biol* 17:974–989. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02307.x
- Verburg PH, van de Steeg J, Veldkamp A, Willemsen L (2009) From land cover change to land function dynamics: A major challenge to improve land characterization. *J Environ Manage* 90:1327–1335. doi: 10.1016/j.jenvman.2008.08.005
- Vidal J-P, Martin E, Franchistéguy L, et al. (2010) A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *Int J Climatol* 30:1627–1644. doi: 10.1002/joc.2003
- Vinck D (1999) Les objets intermédiaires dans les réseaux de coopération scientifique. Contribution à la prise en compte des objets dans les dynamiques sociales. *Rev Fr Sociol* 40:385–414. doi: 10.2307/3322770
- Vitali G, Cardillo C, Albertazzi S, et al. (2012) Classification of Italian Farms in the FADN Database Combining Climate and Structural Information. *Cartogr Int J Geogr Inf Geovisualization* 47:228–236. doi: 10.3138/carto.47.4.1478
- van Vliet J, de Groot HL, Rietveld P, Verburg PH (2015) Manifestations and underlying drivers of agricultural land use change in Europe. *Landsc Urban Plan* 133:24–36. doi: 10.1016/j.landurbplan.2014.09.001
- Waldner F, Fritz S, Di Gregorio A, Defourny P (2015a) Mapping Priorities to Focus Cropland Mapping Activities: Fitness Assessment of Existing Global, Regional and National Cropland Maps. *Remote Sens* 7:7959–7986. doi: 10.3390/rs70607959
- Waldner F, Lambert M-J, Li W, et al. (2015b) Land Cover and Crop Type Classification along the Season Based on Biophysical Variables Retrieved from Multi-Sensor High-Resolution Time Series. *Remote Sens* 7:10400–10424. doi: 10.3390/rs70810400
- Xiao Y, Mignolet C, Mari J-F, Benoît M (2014) Modeling the spatial distribution of crop sequences at a large regional scale using land-cover survey data: A case from France. *Comput Electron Agric* 102:51–63. doi: 10.1016/j.compag.2014.01.010
- Yunju L, Kahrl F, Jianjun P, et al. (2012) Fertilizer use patterns in Yunnan Province, China: Implications for agricultural and environmental policy. *Agric Syst* 110:78–89. doi: 10.1016/j.agsy.2012.03.011
- Zimmermann J, González A, Jones MB, et al. (2016) Assessing land-use history for reporting on cropland dynamics—A comparison between the Land-Parcel Identification System and traditional inter-annual approaches. *Land Use Policy* 52:30–40. doi: 10.1016/j.landusepol.2015.11.027

## 13. Bibliographie

- AEAG (2015) Agence de l'Eau Adour-Garonne. Système d'information sur l'eau du Bassin Adour-Garonne. Droits de reproduction réservés et strictement limités. <http://adour-garonne.eaufrance.fr/>. Accessed 12 Feb 2016
- Antoni V, Saby N, Jolivet C, et al. (2007) The french information system on soils: a decision support system for soil inventory, monitoring and management. *Environ. Inform. Syst. Res. Warsaw (POL°*, pp 255–262
- Aouadi N, Aubertot JN, Caneill J, Munier-Jolain N (2015) Analyzing the impact of the farming context and environmental factors on cropping systems: A regional case study in Burgundy. *Eur J Agron* 66:21–29. doi: 10.1016/j.eja.2015.02.006
- ASP (2012) Agence de Service et de Paiement [Agency for Service and Payment]. Registre parcellaire graphique anonyme [French Anonymous Land Parcel Identification System]. <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/registre-parcellaire-graphique-2012-contours-des-ilots-culturaux-et-leur-groupe-de-cultures-majorita/>.
- Aubry C, Papy F, Capillon A (1998) Modelling decision-making processes for annual crop management. *Agric Syst* 56:45–65. doi: 16/S0308-521X(97)00034-6
- Bailly JS, Biarnès A, Lagacherie P (2010) Semi-virtual spatial simulations of land management practices in Languedoc Vineyards: a way to deal with incomplete knowledges of spatial distributions in cultivated landscapes.
- Balestrat M., 2011. Système d'indicateurs spatialisés pour la gouvernance territoriale : application à l'occupation des sols en zone périurbaine languedocienne. Géographie. Université Paul Valéry - Montpellier III, 2011. Français. <https://tel.archives-ouvertes.fr/tel-00655401/>
- Bégué A, Arvor D, Lelong C, et al. (2015) Agricultural Systems Studies Using Remote Sensing. In: Prasad ST (ed) *Land Resour. Monit. Model. Mapp. Remote Sens.* CRC Press, pp 113–130
- Benoît M, Rizzo D, Marraccini E, et al. (2012) Landscape agronomy: a new field for addressing agricultural landscape dynamics. *Landsc Ecol* 27:1385–1394. doi: 10.1007/s10980-012-9802-8
- Bergez J-E, Debaeke P, Deumier J-M, et al. (2001) MODERATO: an object-oriented decision tool for designing maize irrigation schedules. *Ecol Model* 137:43–60. doi: 10.1016/S0304-3800(00)00431-2
- Biarnès A, Bailly J, Boissieux Y (2009) Identifying indicators of the spatial variation of agricultural practices by a tree partitioning method: The case of weed control practices in a vine growing catchment. *Agric Syst* 99:105–116. doi: 10.1016/j.agsy.2008.10.002
- Boiffin J, Benoît M, Le Bail M, et al. (2014) Agronomie, espace, territoire : travailler « pour et sur » le développement territorial, un enjeu pour l'agronomie. *Cah Agric* 23:72–83. doi: 10.1684/agr.2014.0688
- Bouty C, Levavasseur F, Martin P, Barbottin A (2015) Are crop sequence evolutions influenced by farm territory dynamics? Montpellier, France, p poster
- Buller H (2009) The lively process of interdisciplinarity. *Area* 41:395–403. doi: 10.1111/j.1475-4762.2008.00856.x
- Castellazzi MS, Matthews J, Angevin F, et al. (2010) Simulation scenarios of spatio-temporal arrangement of crops at the landscape scale. *Environ Model Softw* 25:1881–1889. doi: 10.1016/j.envsoft.2010.04.006
- Clavel L, Soudais J, Baudet D, Leenhardt D (2011) Integrating expert knowledge and quantitative information for mapping cropping systems. *Land Use Policy* 28:57–65. doi: 16/j.landusepol.2010.05.001
- Constantin J, Willaume M, Murgue C, et al. (2015) The soil-crop models STICS and AqYield predict yield and soil water content for irrigated crops equally well with limited data. *Agric For Meteorol* 206:55–68. doi: 10.1016/j.agrformet.2015.02.011
- Debolini M, Marraccini E, Rizzo D, et al. (2013) Mapping local spatial knowledge in the assessment of agricultural systems: A case study on the provision of agricultural services. *Appl Geogr* 42:23–33. doi: 10.1016/j.apgeog.2013.04.006
- Debril T, Therond O (2012) 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. *Agron Environ Sociétés* 2:127–137.
- Deffontaines J-P (1973) Analyse du paysage et étude régionale des systèmes de production agricole. *Économie Rurale* 98:3–13. doi: 10.3406/ecoru.1973.2232
- Dice LR (1945) Measures of the Amount of Ecologic Association Between Species. *Ecology* 26:297–302. doi: 10.2307/1932409

- Dupas R, Parnaudeau V, Reau R, et al. (2015) Integrating local knowledge and biophysical modeling to assess nitrate losses from cropping systems in drinking water protection areas. *Environ Model Softw* 69:101–110. doi: 10.1016/j.envsoft.2015.03.009
- Durpoix A, Barataud F (2014) Intérêts de l'analyse territorialisée des parcelles des exploitations agricoles concernées par une aire d'alimentation de captage. *Sci Eaux Territ hors-séries*:2–6.
- Duru M, Therond O, Fares M (2015) Designing agroecological transitions; A review. *Agron Sustain Dev* 1–21. doi: 10.1007/s13593-015-0318-x
- EEA (2012) European Environment Agency. Corine Land Cover 2006 seamless vector data. Version 16 (04/2012). <http://www.eea.europa.eu/data-and-maps/data/clc-2006-vector-data-version-2>.
- EEA (2015) European Environment Agency. CLC 2012 v.18.4. In: Copernic. Land Monit. Serv. <http://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover/clc-2012/view>. Accessed 12 Feb 2016
- European Environment Agency E (2012) Territorial cohesion and water management in Europe: the spatial perspective. 82.
- Eurostat (2015) Regions in the European Union - Nomenclature of territorial units for statistics - NUTS 2013/EU-28. 144.
- Fuchs R, Herold M, Verburg PH, Clevers JGPW (2013) A high-resolution and harmonized model approach for reconstructing and analysing historic land changes in Europe. *Biogeosciences* 10:1543–1559. doi: 10.5194/bg-10-1543-2013
- Fuzeau V, Dubois G, Therond O, Allaire G (2012) Diversification des cultures dans l'agriculture française : état des lieux et dispositif d'accompagnement. 22.
- Gaudou B, Sibertin-Blanc C, Therond O, et al. (2013) The MAELIA multi-agent platform for integrated assessment of low-water management issues. pp pp. 85–110
- Glavan M, Pintar M, Urbanc J (2015) Spatial variation of crop rotations and their impacts on provisioning ecosystem services on the river Drava alluvial plain. *Sustain Water Qual Ecol* 5:31–48. doi: 10.1016/j.swaqe.2015.01.004
- Hipolito J (2012) Distribution spatiale et caractérisation des systèmes de culture dans le territoire irrigué à l'aval de la rivière Aveyron. M. Sc., SupAgro, Montpellier (FRA)
- Houet T, Loveland TR, Hubert-Moy L, et al. (2010) Exploring subtle land use and land cover changes: a framework for future landscape studies. *Landsc Ecol* 25:249–266. doi: 10.1007/s10980-009-9362-8
- 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. *Int J Geogr Inf Sci* 0:1–29. doi: 10.1080/13658816.2014.900775
- Hutchings NJ, Reinds GJ, Leip A, et al. (2012) A model for simulating the timelines of field operations at a European scale for use in complex dynamic models. *Biogeosciences* 9:4487–4496. doi: 10.5194/bg-9-4487-2012
- Joannon A, Souchère V, Martin P, Papy F (2006) Reducing runoff by managing crop location at the catchment level, considering agronomic constraints at farm level. *Land Degrad Dev* 17:467–478. doi: 10.1002/ldr.714
- King D, Stengel P, Jamagne M, et al. (2005) Soil Mapping and Soil Monitoring: State of Progress and Use in France. *Soil Resour. Eur. Second Ed. Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg*, pp 139–146
- Kollas C, Kersebaum KC, Nendel C, et al. (2015) Crop rotation modelling—A European model intercomparison. *Eur J Agron* 70:98–111. doi: 10.1016/j.eja.2015.06.007
- Kuemmerle T, Erb K, Meyfroidt P, et al. (2013) Challenges and opportunities in mapping land use intensity globally. *Curr Opin Environ Sustain*. doi: 10.1016/j.cosust.2013.06.002
- Le Bris, 2008. Note sur la validation et la prédiction des données météorologiques au sein de la base de données EOLE. Rapport interne Arvalis. 12p
- Leenhardt D, Angevin F, Biarnès A, et al. (2010) Describing and locating cropping systems on a regional scale. A review. *Agron Sustain Dev* 30:131–138. doi: 10.1051/agro/2009002
- Leenhardt D, Maton L, Bergez J-E (2016) Simulating farming practices within a region using a stochastic bio-decisional model: Application to irrigated maize in south-western France. *Eur J Agron* 75:139–148. doi: 10.1016/j.eja.2016.01.013
- Leenhardt D, Therond O, Mignolet C (2012) Quelle représentation des systèmes de culture pour la gestion de l'eau sur un grand territoire ? *Agron Environ Sociétés* 2:77–89.
- Lemaire G, Gastal F, Franzluebbers A, Chabbi A (2015) Grassland–Cropping Rotations: An Avenue for Agricultural Diversification to Reconcile High Production with Environmental Quality. *Environ Manage* 1–13. doi: 10.1007/s00267-015-0561-6
- Leteinturier B, Herman JL, Longueville F de, et al. (2006) Adaptation of a crop sequence indicator based on a land parcel management system. *Agric Ecosyst Environ* 112:324–334. doi: 10.1016/j.agee.2005.07.011
- Levin G (2013) Applying parcel-specific land-use data for improved monitoring of semi-natural grassland in Denmark. *Environ Monit Assess* 185:2615–2625. doi: 10.1007/s10661-012-2735-5

- Lovell ST, DeSantis S 'ra, Nathan CA, et al. (2010) Integrating agroecology and landscape multifunctionality in Vermont: An evolving framework to evaluate the design of agroecosystems. *Agric Syst* 103:327–341. doi: 10.1016/j.agry.2010.03.003
- Marie M, Bermond M, Gouée PL, Delahaye D (2008) Intérêts et limites des statistiques agricoles pour l'étude des structures spatiales produites par l'agriculture en Basse-Normandie. *Norois Environ Aménagement Société* 21–33. doi: 10.4000/norois.1954
- Marraccini E, Rapey H, Galli M, et al. (2013) Assessing the Potential of Farming Regions to Fulfill Agro-Environmental Functions: A Case Study in Tuscany (Italy). *Environ Manage* 759–776. doi: 10.1007/s00267-012-9997-0
- Martínez-Casasnovas JA, Martín-Montero A, Auxiliadora Casterad M (2005) Mapping multi-year cropping patterns in small irrigation districts from time-series analysis of Landsat TM images. *Eur J Agron* 23:159–169. doi: 10.1016/j.eja.2004.11.004
- Mathevet R, Antona M, Barnaud C, et al. (2014) Contexts and dependencies in the ComMod processes. *Companion Model*. Springer, pp 103–125
- Maton L, Bergez J-E, Leenhardt D (2007) Modelling the days which are agronomically suitable for sowing maize. *Eur J Agron* 27:123–129. doi: 10.1016/j.eja.2007.02.007
- Mazzega P, Therond O, Debril T, et al. (2014) Critical multi-level governance issues of integrated modelling: An example of low-water management in the Adour-Garonne basin (France). *J Hydrol* 519, Part C:2515–2526. doi: 10.1016/j.jhydrol.2014.09.043
- Mignolet C, Schott C, Benoît M (2007) Spatial dynamics of farming practices in the Seine basin: Methods for agronomic approaches on a regional scale. *Sci Total Environ* 375:13–32.
- Moraine M, Duru M, Nicholas P, et al. (2014) Farming system design for innovative crop-livestock integration in Europe. *animal* 8:1204–1217. doi: 10.1017/S1751731114001189
- Moss MR (2000) Interdisciplinarity, landscape ecology and the Transformation of Agricultural Landscapes'. *Landsc Ecol* 15:303–311. doi: 10.1023/A:1008144402408
- Murgue C (2014) Quelles distributions spatiales des systèmes de culture pour limiter l'occurrence des crises de gestion quantitative de l'eau? Une démarche de conception évaluation sur le territoire irrigué de l'Aveyron aval. PhD Thesis, Université de Toulouse (FR)
- Murgue C, Lardy R, Vavasseur M, et al. (2014) Fine spatio-temporal simulation of cropping and farming systems effects on irrigation withdrawal dynamics within a river basin.
- Murgue C, Therond O, Leenhardt D (2015) Toward integrated water and agricultural land management: Participatory design of agricultural landscapes. *Land Use Policy* 45:52–63. doi: 10.1016/j.landusepol.2015.01.011
- Murgue C, Therond O, Leenhardt D (under review) Hybridizing local and generic information to model cropping system spatial distribution in an agricultural landscape. *Land Use Policy*
- Nesme T, Bellon S, Lescourret F, et al. (2005) Are agronomic models useful for studying farmers' fertilisation practices? *Agric Syst* 83:297–314. doi: 10.1016/j.agry.2004.05.001
- Nesme T, Lescourret F, Bellon S, Habib R (2010) Is the plot concept an obstacle in agricultural sciences? A review focussing on fruit production. *Agric Ecosyst Environ* 138:133–138. doi: 10.1016/j.agee.2010.04.014
- O'Keeffe J, Buytaert W, Mijic A, et al. (2015) The use of semi-structured interviews for the characterisation of farmer irrigation practices. *Hydrol Earth Syst Sci Discuss* 12:8221–8246. doi: 10.5194/hessd-12-8221-2015
- Oliver YM, Robertson MJ, Wong MTF (2010) Integrating farmer knowledge, precision agriculture tools, and crop simulation modelling to evaluate management options for poor-performing patches in cropping fields. *Eur J Agron* 32:40–50. doi: 10.1016/j.eja.2009.05.002
- Ramankutty N, Foley JA, Norman J, McSweeney K (2002) The global distribution of cultivable lands: current patterns and sensitivity to possible climate change. *Glob Ecol Biogeogr* 11:377–392. doi: 10.1046/j.1466-822x.2002.00294.x
- Ray DK, Ramankutty N, Mueller ND, et al. (2012) Recent patterns of crop yield growth and stagnation. *Nat Commun* 3:1293. doi: 10.1038/ncomms2296
- Rizzo D, Marraccini E, Lardon S, et al. (2013) Farming systems designing landscapes: land management units at the interface between agronomy and geography. *Geogr Tidsskr-Dan J Geogr* 113:71–86. doi: 10.1080/00167223.2013.849391
- Rizzo D, Martin L, Wohlfahrt J (2014) Miscanthus spatial location as seen by farmers: A machine learning approach to model real criteria. *Biomass Bioenergy* 66:348–363. doi: 10.1016/j.biombioe.2014.02.035
- Rounsevell MDA, Arneth A (2011) Representing human behaviour and decisional processes in land system models as an integral component of the earth system. *Glob Environ Change* 21:840–843. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2011.04.010
- Rounsevell MDA, Pedrolí B, Erb K-H, et al. (2012) Challenges for land system science. *Land Use Policy* 29:899–910. doi: 10.1016/j.landusepol.2012.01.007
- Ruiz-Martínez I, Marraccini E, Debolini M, Bonari E (2015) Indicators of agricultural intensity and intensification: a review of the literature. *Ital J Agron* 10:74. doi: 10.4081/ija.2015.656

- Sagris V (2013) Land Parcel Identification System conceptual model: development of geoinfo community conceptual model. PhD thesis, University of Tartu (Estonia)
- Sahajpal R, Zhang X, Izaurralde RC, et al. (2014) Identifying representative crop rotation patterns and grassland loss in the US Western Corn Belt. *Comput Electron Agric* 108:173–182. doi: 10.1016/j.compag.2014.08.005
- Schaller N, Lazrak EG, Martin P, et al. (2012) Combining farmers' decision rules and landscape stochastic regularities for landscape modelling. *Landsc Ecol* 27:433–446. doi: 10.1007/s10980-011-9691-2
- Scherr SJ, McNeely JA (2008) Biodiversity conservation and agricultural sustainability: towards a new paradigm of "ecoagriculture" landscapes. *Philos Trans R Soc B Biol Sci* 363:477–494. doi: 10.1098/rstb.2007.2165
- Sebillotte M (1990) Système de culture, un concept opératoire pour les agronomes. *Systèmes Cult* 165–196.
- Soubeyroux J-M, Vidal J-P, Baillon M, et al. (2010) Caractérisation et prévision des sécheresses et étiages en France à partir de la chaîne hydrométéorologique Safran-Isba-Modcou. *Houille Blanche* 30–39. doi: 10.1051/lhb/2010051
- Steinmann HH, Dobers ES (2013) Spatio-temporal analysis of crop rotations and crop sequence patterns in Northern Germany: potential implications on plant health and crop protection. *J Plant Dis Prot JPDP* 120:85–94.
- Teillard F, Allaire G, Cahuzac E, et al. (2012) A novel method for mapping agricultural intensity reveals its spatial aggregation: Implications for conservation policies. *Agric Ecosyst Environ* 149:135–143. doi: 10.1016/j.agee.2011.12.018
- Temme AJAM, Verburg PH (2011) Mapping and modelling of changes in agricultural intensity in Europe. *Agric Ecosyst Environ* 140:46–56. doi: 10.1016/j.agee.2010.11.010
- Thenail C, Joannon A, Capitaine M, et al. (2009) The contribution of crop-rotation organization in farms to crop-mosaic patterning at local landscape scales. *Agric Ecosyst Environ* 131:207–219. doi: 10.1016/j.agee.2009.01.015
- Therond O, Hengsdijk H, Casellas E, et al. (2011) Using a cropping system model at regional scale: Low-data approaches for crop management information and model calibration. *Agric Ecosyst Environ* 142:85–94. doi: 10.1016/j.agee.2010.05.007
- Therond O, Sibertin-Blanc C, Lardy R, et al. (2014) Integrated modelling of social-ecological systems: The MAELIA high-resolution multi-agent platform to deal with water scarcity problems.
- Toffolini Q, Jeuffroy M-H, Prost L (2015) Indicators used by farmers to design agricultural systems: a survey. *Agron Sustain Dev* 36:1–14. doi: 10.1007/s13593-015-0340-z
- Tremblay M-A (1957) The Key Informant Technique: A Nonethnographic Application. *Am Anthropol* 59:688–701. doi: 10.1525/aa.1957.59.4.02a00100
- Tress G, Tress B, Bloemmen MHI (2003) From tacit to explicit knowledge in integrative and participatory research. WUR-Altterra
- van Vliet J, de Groot HL, Rietveld P, Verburg PH (2015) Manifestations and underlying drivers of agricultural land use change in Europe. *Landsc Urban Plan* 133:24–36. doi: 10.1016/j.landurbplan.2014.09.001
- Verburg PH, Neumann K, Nol L (2011) Challenges in using land use and land cover data for global change studies. *Glob Change Biol* 17:974–989. doi: 10.1111/j.1365-2486.2010.02307.x
- Verburg PH, van de Steeg J, Veldkamp A, Willemen L (2009) From land cover change to land function dynamics: A major challenge to improve land characterization. *J Environ Manage* 90:1327–1335. doi: 10.1016/j.jenvman.2008.08.005
- Vidal J-P, Martin E, Franchistéguy L, et al. (2010) A 50-year high-resolution atmospheric reanalysis over France with the Safran system. *Int J Climatol* 30:1627–1644. doi: 10.1002/joc.2003
- Vinck D (1999) Les objets intermédiaires dans les réseaux de coopération scientifique. Contribution à la prise en compte des objets dans les dynamiques sociales. *Rev Fr Sociol* 40:385–414. doi: 10.2307/3322770
- Vitali G, Cardillo C, Albertazzi S, et al. (2012) Classification of Italian Farms in the FADN Database Combining Climate and Structural Information. *Cartogr Int J Geogr Inf Geovisualization* 47:228–236. doi: 10.3138/carto.47.4.1478
- Waldner F, Fritz S, Di Gregorio A, Defourny P (2015) Mapping Priorities to Focus Cropland Mapping Activities: Fitness Assessment of Existing Global, Regional and National Cropland Maps. *Remote Sens* 7:7959–7986. doi: 10.3390/rs70607959
- Xiao Y, Mignolet C, Mari J-F, Benoît M (2014) Modeling the spatial distribution of crop sequences at a large regional scale using land-cover survey data: A case from France. *Comput Electron Agric* 102:51–63. doi: 10.1016/j.compag.2014.01.010
- Yunju L, Kahrl F, Jianjun P, et al. (2012) Fertilizer use patterns in Yunnan Province, China: Implications for agricultural and environmental policy. *Agric Syst* 110:78–89. doi: 10.1016/j.agry.2012.03.011
- Zimmermann J, González A, Jones MB, et al. (2016) Assessing land-use history for reporting on

## 14. Table des illustrations

Figure 1: Présentation schématique de MAELIA. © Clément Murgue - Romain Lardy - Delphine Leenhardt – Olivier Therond.....	11
Figure 2: Situation des 3 terrains Aveyron-aval, Tarn-aval et Adour-amont au sein du bassin Adour-Garonne. © Clément Murgue .....	12
Figure 3: Comparaison des données simulées et des données “agence” (déclarées) de volumes prélevés annuels sur les deux unités de gestion étudiées (Tarn-aval et Adour-amont). © Davide Rizzo .....	18
Figure 4 : Exemple de cartographie des canaux en croisant la BD CARTHAGE® et les BDD sur les points de prélèvements © Clément Murgue .....	24
Figure 5 : Schéma de la Représentation des Unités Cartographiques des Sols et des Unités Typologiques de Sol dans la BDGSF © Clément Murgue .....	<b>Erreur ! Signet non défini.</b>
Figure 6 : Base de Données Géographique des Sols de France au 1/10 <sup>6</sup> . Contact BDGSF : Bertrand Laroche <a href="mailto:BERTRAND.LAROCHE@ORLEANS.INRA.FR">BERTRAND.LAROCHE@ORLEANS.INRA.FR</a> .....	27
Figure 7 : Illustration de la méthode de cartographie participative et des informations récoltées © Clément Murgue .....	30
Figure 8. Comparaison des simulations des cumuls d'eau prélevés pour l'irrigation pour les années 2000 à 2013 sur chacun des bassins versants du Tarn aval. En bleu, les volumes simulés à l'aide du climat spatialisé par ClimBox, en rouge à l'aide du climat SAFRAN et en vert les volumes estimés par l'Agence de l'eau. © Romain Lardy .....	32
Figure 9. Validation croisée des climats spatialisés par ClimBox (en rouge) ou par la reconstruction SAFRAN (en bleu). Les variables comparées sont sur A) les précipitations, B) les ETP, C) les températures maximales et D) les températures minimales, E) les températures moyennes, F) P-ETP du 15 juin au 15 septembre, de 2001 à 2013, sur le territoire du Tarn aval. Chaque point représente un cumul par an par site de mesure. © Romain Lardy.....	34
Tableau 1 : Principales caractéristiques des terrains Aveyron aval (pour rappel), Tarn aval et Adour amont.....	12
Tableau 2 : Bases de données permettant la représentation spatiale des éléments du système hydrologique. ....	13
Tableau 3 : Variables sol nécessaires au fonctionnement des modèles mobilisés par MAELIA .....	29
Tableau 4 : exemple de table de caractérisation des matériel utilisé pour l'irrigation sur le territoire (issu d'un atelier sur le Tarn Aval dans le cadre de SIMULTEAU) .....	35

## 15. Remerciements

Les auteurs remercient les conseillers agricoles largement sollicités comme experts pour la représentation des systèmes de culture, les membres du projet SIMULTEAU pour leurs remarques utiles lors des présentations successives de ce travail, ainsi que les collègues informaticiens Pierre Casel et Denis Baudet, de l'INRA, pour leur aide pour la modélisation et la manipulation des données.

***INRA - Centre de Recherches de  
Toulouse***

CS 52627  
31326 Castanet Tolosan Cedex

**05 61 28 50 28**  
[www.toulouse.inra.fr](http://www.toulouse.inra.fr)

**Onema**

Hall C – Le Nadar  
5, square Félix Nadar  
94300 Vincennes

**01 45 14 36 00**  
[www.onema.fr](http://www.onema.fr)