



HAL
open science

Estimation et spatialisation de la demande en eau agricole en France : intégration du facteur eau à un modèle bioéconomique

Delphine Barberis, Pierre-Alain Jayet, Pierre Humblot, Anna Lungarska

► To cite this version:

Delphine Barberis, Pierre-Alain Jayet, Pierre Humblot, Anna Lungarska. Estimation et spatialisation de la demande en eau agricole en France : intégration du facteur eau à un modèle bioéconomique. Spatial Analysis and GEomatics 2017, INSA de rouen, Nov 2017, Rouen, France. hal-01649747

HAL Id: hal-01649747

<https://hal.science/hal-01649747>

Submitted on 27 Nov 2017

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.

Estimation et spatialisation de la demande en eau agricole en France : intégration du facteur eau à un modèle bioéconomique

Pierre-Alain Jayet¹, Delphine Barberis¹, Pierre Humblot¹, Anna Lungarska¹

1. UMR INRA-Agro Paris Tech *Économie Publique*
1 Avenue Lucien Brétignières, 78850 Thiverval-Grignon, France
pierre-alain.jayet@inra.fr

RESUME. Les pressions actuelles exercées sur la ressource en eau et la menace potentielle du changement climatique devraient fortement influencer sa disponibilité et, de façon corrélative, la demande d'irrigation. Dans une optique d'aide à la décision publique, nous développons dans cet article une approche centrée sur l'entrant eau afin d'évaluer la demande française associée. La méthode repose sur le couplage du modèle d'offre agricole AROPAj avec le modèle de culture STICS ainsi que sur l'obtention de cartes à haute résolution. Dans le but de donner un aperçu des sorties possibles, une application illustrative du modèle est proposée, basée sur l'analyse spatiale de la demande d'irrigation et des disparités régionales. Cette étude révèle des zones fortement irriguées à l'ouest et au sud-est de la France expliquées par l'implantation de cultures gourmandes en eau (maïs, tournesol).

ABSTRACT. Present pressures on the water resource and the potential threat of climate change should strongly impact water availability and, consequently, irrigation demand. In order to help public decision-makers, we develop an approach where water is modeled as an input, and assess water demand in France. The method combines the economic model AROPAj, the STICS crop model, and the generation of high-resolution maps. As an illustration of the possible outputs of our modeling approach, we propose an application based on the spatial analysis of irrigation demand and regional disparities. This study reveals highly irrigated areas in the west and south-east of France, explained by the establishment of water-intensive crops like maize and sunflower.

MOTS-CLES : demande en eau d'irrigation, modèle bioéconomique d'offre agricole, modèle de culture, fonction de rendement, occupation du sol

KEYWORDS: agricultural water demand, bio-economic supply model, crop model, yield function, land use

1. Introduction

Avec 3 milliards de mètres cubes prélevés en 2009, l'agriculture française est un secteur d'activité très consommateur d'eau (Eau France, 2012). Face à une demande alimentaire croissante corrélée à une intensification des facteurs de production et une multiplication des terres cultivées (en particulier irriguées), la menace d'une potentielle baisse de la disponibilité en eau est plus que jamais présente, accentuée par les conséquences probables du changement climatique. En France, l'existence de pratiques d'irrigation disparates d'une région à l'autre (intensive dans le Sud et moins marquées dans le Nord) complexifie les prises de décision territoriale en matière de gestion intégrée de la ressource. Les tensions actuelles s'intensifient par le risque d'augmentation des restrictions de prélèvements et d'usages de l'eau. Dans un objectif d'aide à la décision publique, la mise en place d'outils de modélisation appropriés apparaît indispensable à une gestion optimale de la ressource en accord avec le maintien de hauts niveaux de production agricole. Au vu d'un environnement économique et physique mondial en constante évolution, il convient d'évaluer et plus encore de spatialiser la demande d'irrigation actuelle afin d'en faire émerger d'éventuelles stratégies d'adaptation.

Dans cette étude, nous partons du monde agricole tel que représenté par le modèle agro-économique, AROPAj, et proposons une analyse prospective centrée sur les liens entre rendements et intrants, fournis par le modèle de culture STICS. Nous optons ainsi pour l'emploi d'un modèle « bioéconomique » ayant pour principale visée la simulation du comportement des agriculteurs par incorporation d'informations agronomiques (Janssen et van Ittersum, 2007). Il s'agit, en d'autres termes, d'analyser les choix des producteurs en termes d'assolement et d'utilisation d'intrants mais également d'anticiper les externalités associées. Cette forme d'approche est la plus fréquemment utilisée dans l'étude des enjeux environnementaux et des intrants agricoles, comme en atteste la littérature (Cortignani et Severini, 2009 ; Kampas *et al.*, 2012 ; Medellín-Azuara *et al.*, 2012 ; Jayet et Petsakos, 2013 ; Graveline et Mérel, 2014 ; Larson *et al.*, 1996 ; Godard *et al.*, 2008). Des fonctions de réponse d'intrants (eau et azote) sont déterminées pour chacune des 8 cultures les plus commercialisées en Europe. De multiples informations telles que la marge brute et la demande d'irrigation sont ainsi obtenues à l'échelle du pays. Bien que l'approche soit conçue au niveau européen, la France est privilégiée en raison de sa représentativité en termes de diversité de productions agricoles, de climat et de sol.

L'intégration du facteur eau corrélée au suivi de la fertilisation azotée, la simulation d'une grande variété de productions sur l'échelle d'un pays entier sont autant d'éléments qui font la force de la démarche développée. Cette étude constitue une extension des travaux réalisés par Humblot (2016). Une attention particulière est accordée à la spatialisation des sorties du modèle et plus particulièrement au prolongement de la méthode de Cantelaube *et al.* (2012) à la nouvelle dimension de l'eau. L'obtention de cartes à haute résolution menant à la visualisation de disparités potentielles dans les pratiques d'irrigation d'une région à l'autre constitue la principale avancée de cette étude mais également son objectif premier.

Dans la section suivante, il conviendra de décrire la méthode développée et plus précisément le couplage AROPAj-STICS, la problématique d'optimisation associée, l'élaboration des fonctions de rendement et la procédure de désagrégation spatiale des sorties du modèle. Dans un deuxième temps, un exemple illustratif sera abordé au travers de l'analyse de la demande d'irrigation actuelle en France et des hétérogénéités régionales. Enfin, nous concluons sur les perspectives futures de la démarche engagée.

2. Matériel et méthode : adaptation d'un modèle bioéconomique et spatialisation des résultats

Dans cet article, nous partons du monde agricole tel que représenté par le modèle agro-économique AROPAj, et proposons une analyse centrée sur les liens entre rendements et intrants (eau, azote) fournis par le modèle de culture STICS (Godard *et al.* 2008 ; Leclère *et al.* 2013 ; Humblot *et al.* 2017) (figure 1) (cf. sections 2.1 et 2.2). La désagrégation des sorties du modèle à l'échelle du pixel pour l'obtention de représentations cartographiques à haute résolution est rendue possible par l'ajout d'un module complémentaire de spatialisation (cf. section 2.3).

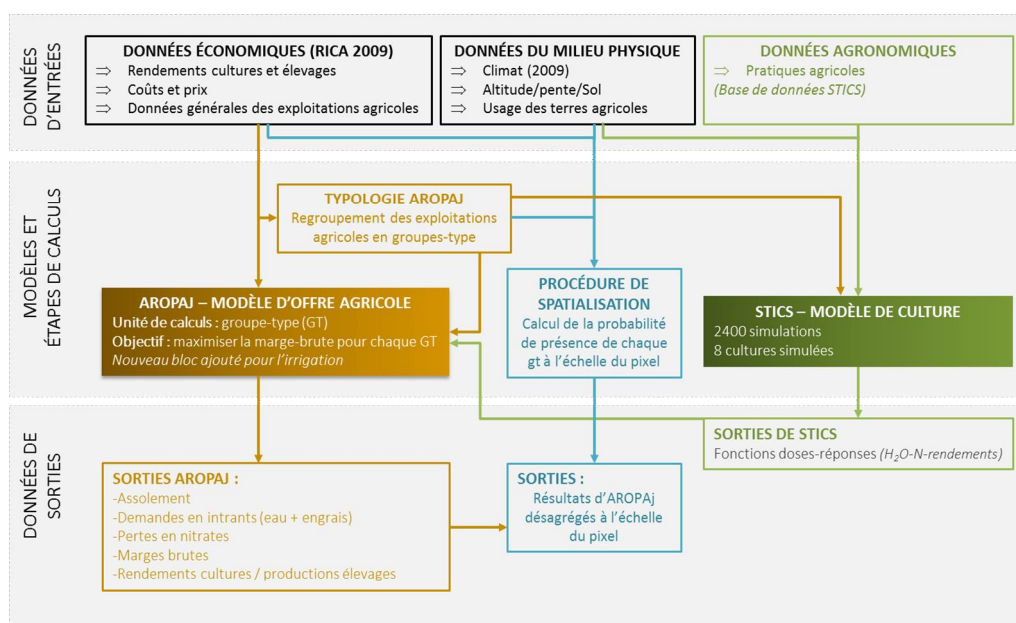


FIGURE 1. Méthode générale et couplage des modèles AROPAj-STICS (En jaune ó le module AROPAj ; en vert ó le module STICS ; en bleu ó le module de spatialisation des résultats)

2.1. Données et outils de modélisation

2.1.1. Le modèle d'offre agricole AROPAj

AROPAJ est un modèle d'offre agricole de programmation linéaire statique¹. Il s'appuie sur l'emploi des données du RICA² et sur la conception de groupes agricoles représentatifs visant à capturer la grande diversité des exploitations de l'Union européenne. L'hypothèse principale est la maximisation de la marge brute de chaque agent économique sous différentes contraintes techniques (type de production, taille du bétail etc.) et économiques (définies selon les règles de la Politique Agricole Commune). Ces agents ou groupes-types (GTs) sont obtenus suite à l'agrégation, par classification automatique, de fermes aux caractéristiques similaires, extraites du RICA 2009. 4 critères sont considérés : l'orientation technico-économique des exploitations, la part de surfaces irriguées, la taille économique et l'altitude. Cette typologie respecte les règles de confidentialité propres aux données du RICA et réduit considérablement le temps de traitement des simulations.

AROPAJ modélise tous les types de productions à la fois animales et végétales à l'exception de l'horticulture, de la viticulture et de l'arboriculture. De multiples informations (ressources consommées, rendements, marge brute, pertes en nitrates etc.) sont ainsi calculées à différentes échelles (exploitation agricole, bassin versant et/ou région, grande région/Europe) (*figure 1*).

La force de cet outil est sa généralité et plus spécifiquement sa capacité à rendre compte avec une grande précision du comportement d'un grand nombre d'exploitations au travers l'étude de divers mécanismes d'adaptation (changement d'allocation des sols, variations des quantités d'intrants, ajustement du capital animal). La version de base d'AROPAJ ne tient pas en compte des différents aspects techniques et physiques des pratiques agricoles. Le couplage à un modèle de culture rend possible l'intégration de divers paramètres agronomiques. L'objectif est ainsi d'affiner le modèle et de simuler la réaction des systèmes agricoles à tout type de changements climatiques et d'environnement économique.

2.1.2. Le modèle de culture STICS

Quoique plus performant dans les zones tempérées, STICS est un modèle générique capable de simuler la croissance d'un grand nombre de cultures dans n'importe quelle région du monde. Il modélise les processus variés se déroulant dans chaque partie d'une plante et fonctionne à un pas de temps journalier, sur une année calendaire voire deux suivant le type de productions considérées (Brisson *et al.*, 2003).

¹ Jayet, P.-A. (n.d.). The European agro-economic AROPAj model.
https://www6.versailles-grignon.inra.fr/economie_publicue/Publications

² RICA : Réseau d'Information Comptable Agricole

Divers éléments sont requis en entrée de STICS (*figure 1*) :

- Des paramètres climatiques fournies par le modèle atmosphérique ARPEGE utilisé pour la prévision numérique des conditions météorologiques (Déqué *et al.*, 1994)
- Des informations pédologiques provenant de la base de données européennes des sols (ESDB)
- Des renseignements liés aux pratiques agricoles issues de la base interne de STICS

De multiples variables agronomiques et environnementales (rendements, pertes d'azote, quantités d'engrais et volume d'eau requis sous objectif d'optimisation du profit) sont estimées en sortie du modèle. Ces résultats contribuent à l'élaboration d'un jeu de fonctions dose-réponse, alliant rendements et intrants eau/azote pour chaque production d'un GT.

2.2. Intégration du facteur eau : obtention de fonctions dose-réponse à 2 variables

En pratique, il existe peu d'informations à l'échelle d'une ferme virtuelle susceptible d'alimenter STICS (e.g. le type de sol et la variété culturale sont inconnus). Pour pallier cette difficulté, un total de 2400 simulations sont réalisées selon différentes modalités de cultures (type de sol, date de semis, variété, \dots) (*tableau 1*) pour chaque GT et pour chacune des 8 principales productions commercialisées en Europe (blé, maïs, orge, colza, tournesol, betterave, pomme de terre, soja).

TABLE 1. Récapitulatif des différentes combinaisons modélisées lors de la phase de création des fonctions dose-réponse dans STICS

Options de saisie de données	Nombre de modalités par culture
Climat	1
Sol	10
Variétés culturales*	16
Date de semis*	5
Précédent cultural	1
Classe d'altitude	3
Nombre total de combinaisons	2 400

*Dépend du type de cultures considérées, ces deux options créent un total de trois combinaisons

Source : Humblot *et al.*, 2017

Pour les systèmes agricoles non irrigués, l'apport en eau est purement exogène c'est-à-dire dépendant des conditions météorologiques. Dans le cas contraire, ce paramètre est modulable. Un processus en deux étapes est développé afin d'obtenir les rendements STICS pour différents volumes d'eau apportés. Une première simulation est réalisée avec des entrées en azote non limitantes (se reporter à la méthode de C. Godard (2008) pour plus d'informations concernant cet intrant). Les quantités d'eau et dates de passage sont fixées automatiquement par STICS. Les apports sont ainsi ajustés aux besoins de la culture et aux données climatiques. Dans

un deuxième temps, l'option d'irrigation automatique du modèle est désactivée. Les informations de la première phase sont stockées. Pour des dates de passage identiques à l'étape précédente, des modélisations STICS successives sont effectuées pour des volumes d'irrigation réduits progressivement d'un facteur compris entre 0 et 100% (0/20/40/60/80/100%) (figure 2). De cette manière, il est possible d'imposer un stress hydrique. Ce dernier affecte les rendements de façon plus ou moins importante selon le facteur de réduction fixé.

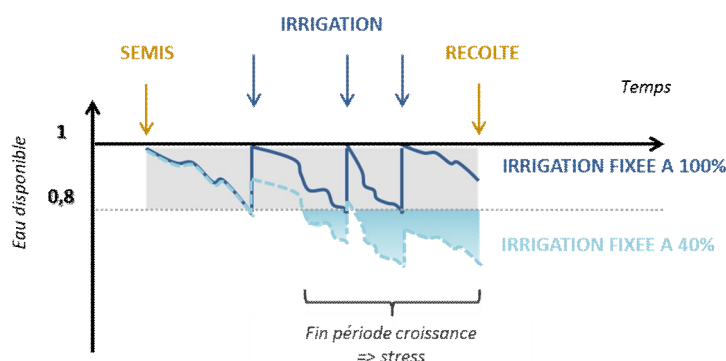


FIGURE 2. Simulation de l'impact des apports d'eau sur les rendements (En bleu foncé : activation de l'option STICS d'irrigation automatique [apports fixés à 100%] ; en bleu clair : quantité d'irrigation réduite mais passages effectués aux mêmes dates [dans cet exemple, apports fixés à 40% par rapport à l'étape précédente])

En conséquence, de multiples relations N-H₂O-rendement sont obtenues et prennent la forme d'une fonction de type Mitscherlich-Baule (figure 3). La méthode ici développée est directement extraite des travaux de Humblot (2016). La relation choisie s'exprime comme suit :

$$Y(W, N | Y_{max}, \sigma, \tau, W_0, N_0) = Y_{max} \times (1 - e^{-\sigma(W+W_0)}) \times (1 - e^{-\tau(N+N_0)})$$

W : eau ajoutée (m^3)	W_0 : eau initiale / précipitation (m^3)	σ : efficacité (m^{-3})
N : azote ajouté (T)	N_0 : azote initial / sol (T)	τ : efficacité (T^{-1})
Y : rendement (T)	Y_{max} : potentiel agronomique (T)	Y, Y_{max}, W, N : quantités par ha

L'étape finale consiste à sélectionner, parmi un ensemble de surfaces éligibles, une relation H₂O-N-rendement pour chaque couple « groupe type / culture », calibrée sur des données « observées » en 2009. Cette sélection repose sur l'emploi d'un critère économique fondé sur des rapports de prix (Humblot *et al.*, 2017). La distance entre "un vecteur gradient" et "un vecteur prix" est mesurée sous l'hypothèse de maximisation de la marge brute agricole. La meilleure combinaison est celle qui minimise l'angle entre les deux vecteurs (figure 3).

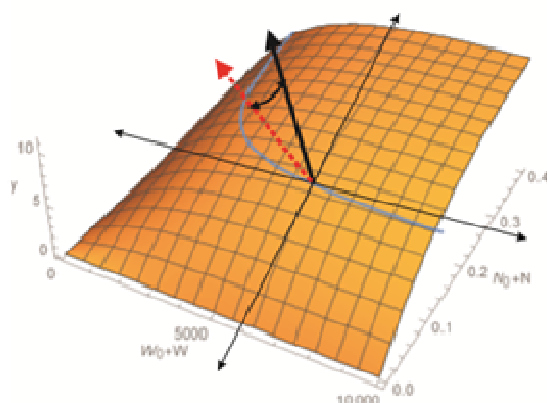


FIGURE 3. Réponse du rendement aux intrants eau et azote :
 Représentation graphique du vecteur de prix et du vecteur « gradient » perpendiculaire au plan tangent à la surface de production, pour un niveau de rendement observé
 Courbe bleue : isoquante
 Source : Humblot *et al.*, 2017.

Une fois calibrées, les fonctions de rendements sont introduites en entrée du modèle d'offre agricole (*figure 1*) et contribuent ainsi au développement du couplage AROPAj-STICS. La demande en eau d'irrigation est évaluée en sortie de simulation, dans un contexte de maximisation de la marge brute des exploitations agricoles, indépendamment d'une offre qui peut s'avérer limitante. Les résultats finaux sont désagrégés spatialement dans le but d'obtenir des représentations cartographiques à haute résolution.

2.3. Méthode de désagrégation spatiale des sorties du modèle à une échelle fine

En raison de la politique de confidentialité du RICA, l'exploitation de résultats utilisant le positionnement géographique d'un individu est interdite. A ce stade, la seule information disponible concerne l'appartenance d'un GT d'AROPAJ à une région spécifique. Cependant, leur localisation probabilisée à l'échelle du pixel est rendue possible suite à la mobilisation de données physiques et de méthodes d'économétrie spatiale. Cette approche repose sur l'estimation de la contribution de chacun des GTs à l'activité agricole dans le but d'établir une désagrégation spatiale des sorties du modèle d'offre agricole à une échelle fine.

Cette méthode a été développée par Chakir (2009), et mise en œuvre par Cantelaube *et al.* (2012) à l'échelle européenne pour une version antérieure d'AROPAJ. Dans cette étude, la procédure de spatialisation a été ainsi étendue à la version V5 d'AROPAJ (RICA 2009) afin d'intégrer les parts de surfaces irriguées des GTs issues de la nouvelle typologie.

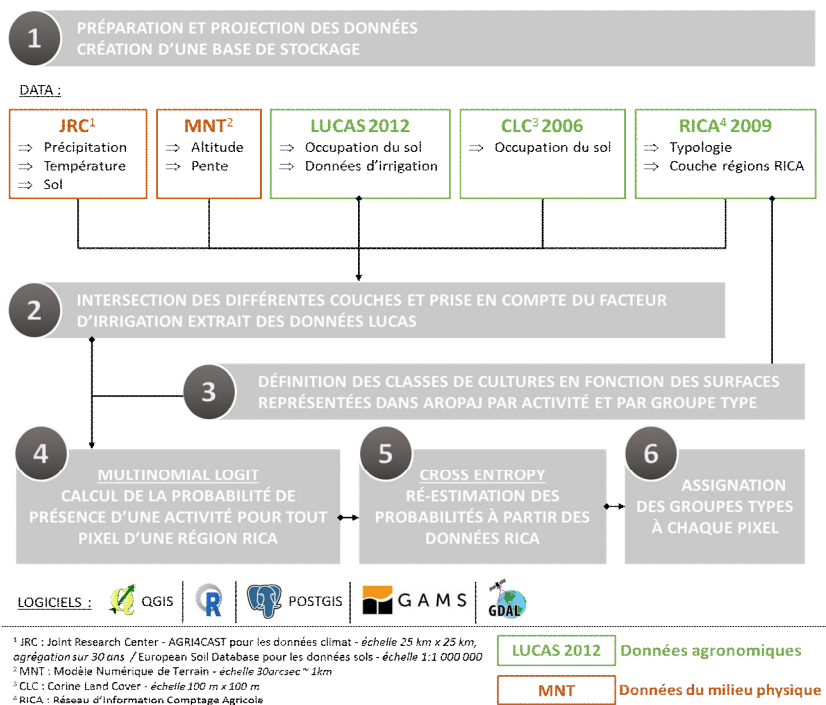


FIGURE 3. Méthode de calcul d'estimation de la localisation probabiliste des groupes types d'exploitations agricoles d'AROPAJ à l'échelle du pixel.

La figure 3 illustre l'ensemble des étapes du processus. De par l'apport des données régionales du RICA, une cartographie précise des GTs est établie au sein de chaque région par mobilisation de divers paramètres propres au milieu physique et au domaine agronomique (occupation du sol, climat, sol, altitude etc.). Dans le but d'initier la première phase de traitement, les différentes couches d'informations géo-référencées sont préparées puis intersectées (étapes 1 et 2 de la figure 3). Un modèle économétrique³ contribue à estimer la probabilité de présence d'une activité agricole (blé, maïs etc.) repérée par les données d'occupation du sol LUCAS⁴, pour tout pixel d'une région, en fonction de variables explicatives extraites de diverses bases (CLC, MNT et MARS) (étapes 3 et 4 de la figure 3). Concernant plus spécifiquement l'élément « eau », les informations sont issues de la base LUCAS. Une grille régulière de 25 x 25 km est ainsi définie. Cette dernière a l'avantage d'être déjà intersectée avec les autres couches utilisées (ex : climat). Pour chaque maille de cette grille, la présence de points irrigués LUCAS est testée. La détection d'au moins un point dans une maille donnée signifie une probabilité plus forte d'abriter des GTs irrigués. A ce stade, les informations fournies par le RICA telles que les proportions régionales d'allocation des terres allouées aux différentes cultures ne sont pas prises

³ MNL model : multinomial logit model

⁴ LUCAS : Land Use/Cover Area frame Survey

en compte. Les probabilités calculées lors de la phase précédente sont affinées par une méthode d'entropie croisée généralisée (Cantelaube *et al.*, 2012), afin de minimiser la différence entre les parts d'utilisation des terres estimées par le modèle et celles observées par le RICA (étape 5 de la *figure 3*). Sous contrainte que la somme des probabilités de présence soit égal à 1, chaque GT est assigné à un pixel (étape 6 de la *figure 3*).

Les sorties du modèle offrent (marge brute, demande en eau d'irrigation etc.) sont pondérées aux superficies culturales et aux probabilités obtenues lors de la phase précédente. La mise en place d'algorithmes a permis l'automatisation des calculs. Il en résulte l'obtention de cartes pour différentes échelles de restitution (parcelles, bassin versant, régions, pays etc.).

3. Exemple illustratif : demande en eau d'irrigation et disparités inter-régionales

Parmi le champ d'applications possibles, une attention particulière est accordée ici à la demande en eau agricole de 2009 (année prise comme référence pour le calibrage d'AROPAj). A travers cet exemple, l'objectif est triple :

- Donner un aperçu des multiples sorties du modèle ;
- Mettre en évidence la capacité du couplage AROPAj-STICS à capter la grande diversité régionale des systèmes agricoles ;
- Etablir des analyses spatiales à différentes échelles (nationale ou régionale) dans le but d'illustrer la flexibilité du modèle :

Ce domaine d'étude a pour avantage d'aborder deux grandes thématiques largement traitées dans la littérature : l'eau et les problématiques liées à l'occupation du sol.

La *figure 4* constitue un aperçu du type de représentation cartographique obtenue suite à la procédure de désagrégation spatiale des sorties d'AROPAj (cf. section 2.3). Elle rend compte de la répartition des pratiques d'irrigation au niveau de la France entière et apporte les premiers ordres de grandeur. Il convient de rappeler que ces valeurs symbolisent une demande en eau dans un contexte de maximisation de la marge brute et n'apportent en rien une indication précise sur l'état de la disponibilité de la ressource ni sur sa consommation réelle pour l'année 2009. Les valeurs d'irrigation varient de 25 (bleu clair) à 200 m³/ha (bleu foncé). La méthode de classification adoptée est celle des classes de seuils naturels. Globalement, l'année 2009 est marquée par de fortes disparités : la réponse des systèmes agricoles varie suivant les régions considérées. Les parties ouest (Aquitaine ó 182 ; Centre ó 134 ; Pays de la Loire ó 162 ; Poitou-Charentes ó 164 ; Midi-Pyrénées - 183) et sud-est de la France (Provence-Alpes-Côte d'Azur/PACA - 203) se caractérisent par de fortes demandes en eau (supérieures à 150 m³/ha). Ces valeurs semblent proches de celles renseignées par le ministère de l'agriculture de 2009 (Eau France, 2012). Néanmoins, pour certaines régions, ces sorties sont à manipuler avec précaution en raison de l'existence de décalages entre données observées et estimations du modèle (Humblot, 2016). Les lacunes en matières d'informations sur les prélèvements en eau (notamment concernant les stations de pompage locales) ou la non prise en compte par AROPAj d'activités agricoles fortement irriguées et répandues dans

certaines régions (ex : horticulture) sont autant d'éléments à garder en mémoire lors de l'interprétation des résultats.

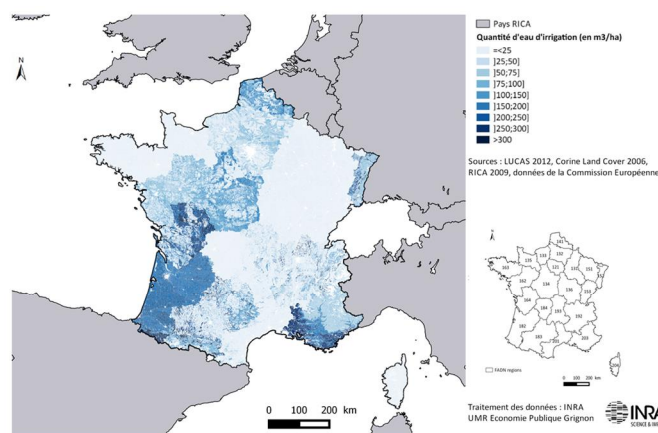


FIGURE 4. Demande en eau d'irrigation pour l'année 2009 en France

Légende : 121 - Île-de-France ; 131 - Champagne-Ardenne ; 132 - Picardie ; 133 - Haute-Normandie ; 134 - Centre ; 135 - Basse Normandie ; 136 - Bourgogne ; 141 - Nord-Pas-de-Calais ; 151 - Lorraine ; 152 - Alsace ; 153 - Franche-Comté ; 162 - Pays de la Loire ; 163 - Bretagne ; 164 - Poitou-Charentes ; 182 - Aquitaine ; 183 - Midi-Pyrénées ; 184 - Limousin ; 192 - Rhône-Alpes ; 193 - Auvergne ; 201 - Languedoc-Roussillon ; 203 - Provence-Alpes-Côte d'Azur

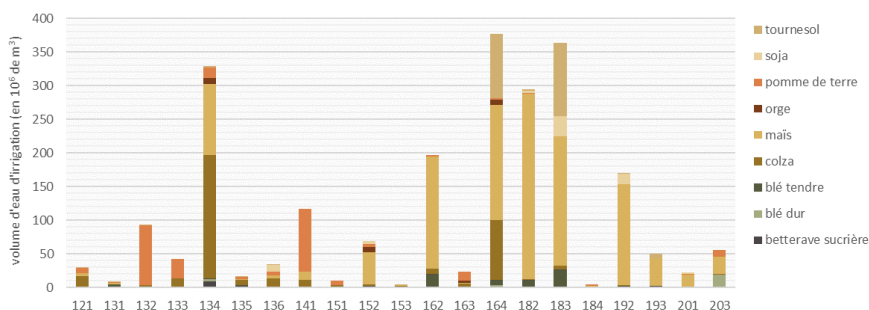


FIGURE 5. Etude régionale de la demande en eau d'irrigation de 2009 par culture

En appui aux résultats précédents, la figure 5 récapitule les volumes d'eau requis par activité agricole et par région. Ici encore, de fortes hétérogénéités spatiales sont mises en évidence. Les 5 zones les plus irriguées citées précédemment, de même que l'Alsace, jusqu'alors non évoquée, se définissent par l'implantation de maïs gourmand en eau. Les fortes demandes des régions du Centre, du Midi-Pyrénées et du Poitou-Charentes se traduisent par l'existence de tournesol et de colza fortement irrigués. La pomme de terre constitue l'un des systèmes cultureux les plus consommateurs au Nord de la France en régions Nord-Pas-de-Calais et en Normandie. En revanche, il est important de noter que les quantités prélevées ne

sont pas forcément corrélées aux surfaces irriguées du fait de la variabilité du facteur climat. De ce fait, les faibles volumes d'eau prélevés en Midi-Pyrénées exprimés dans la *figure 5* n'impliquent pas nécessairement de faibles valeurs par hectare comme en atteste la carte précédente.

Dans le but d'expliquer ces hétérogénéités, il convient d'exprimer une tendance générale quant à la répartition des surfaces culturales entre régions fortement et faiblement irriguées (*figure 6*). Comme abordé précédemment, maïs, blé dur (en PACA) et tournesol (en Poitou-Charentes et en Midi-Pyrénées) sont largement répandues dans les zones les plus irriguées. Parallèlement, les régions telles que Limousin, l'Auvergne ou la Lorraine moins consommatrices (*figure 5*) se caractérisent par la présence de prairies permanentes et de blé tendre non irrigué. Plus généralement, blé tendre, orge, colza et betterave sont majoritairement implantées dans le Nord de la France contrairement aux cultures de blé dur et de tournesol plutôt présentes dans le Sud. Pour aller plus loin dans cette étude, une analyse spatiale régionale fine du facteur climat et plus spécifiquement de la variable pluviométrique permettrait d'apporter des explications supplémentaires sur le choix de l'assolement et sur la répartition disparate des systèmes irrigués.

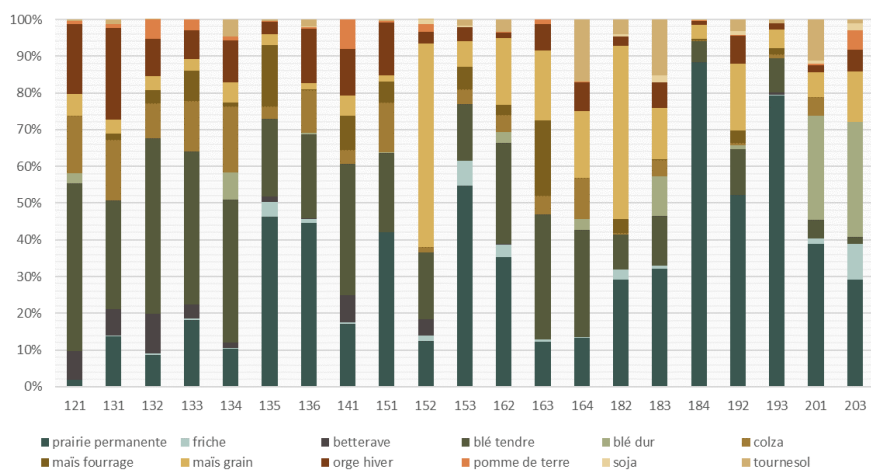


FIGURE 6. Répartition des surfaces (en %) par culture et par région française

Légende : 121 - Île-de-France ; 131 - Champagne-Ardenne ; 132 ó Picardie ; 133 - Haute-Normandie ; 134 ó Centre ; 135 ó Basse Normandie ; 136 ó Bourgogne ; 141 - Nord-Pas-de-Calais ; 151 ó Lorraine ; 152 ó Alsace ; 153 - Franche-Comté ; 162 - Pays de la Loire ; 163 ó Bretagne ; 164 - Poitou-Charentes ; 182 ó Aquitaine ; 183 - Midi-Pyrénées ; 184 ó Limousin ; 192 - Rhône-Alpes ; 193 ó Auvergne ; 201 - Languedoc-Roussillon ; 203 - Provence-Alpes-Côte d'Azur

Comme spécifié précédemment, la culture de maïs constitue le système agricole le plus gourmand en eau (*figure 5*). Cette activité en Poitou-Charentes allie importantes surfaces et forte demande. Pour toutes ces raisons, ce focus sur les surfaces irriguées en maïs dans cette région constitue (*figure 7*) une application illustrative intéressante. L'objectif est ainsi de proposer un exemple d'analyse spatiale à une échelle différente de celle de la carte précédente afin de souligner la grande flexibilité de la méthode développée. Les valeurs varient de 500 (jaune clair)

à 2000 m² (rouge foncé). Ici encore, la méthode de classification adoptée est celle des classes de seuils naturels. Nous constatons que la production ici étudiée est principalement concentrée au Nord de la région. Néanmoins, il apparaît que la localisation de cette dernière dépend de la topographie de la zone. Les valeurs les plus fortes sont localisées le long du réseau hydrographique du fleuve Charente et de ses différents affluents. Nous observons, pour finir, une correspondance avec les résultats obtenus précédemment concernant le volume d'eau requis (en m³/ha) du Poitou-Charentes toutes activités confondues (figure 4). Dans ce cas précis, l'implantation du maïs irrigué régie la demande d'irrigation. L'existence d'artefacts ou de brusques basculements de valeurs d'un pixel à l'autre s'explique par l'emploi d'une grille climatique étendue de 25 x 25 km lors de la procédure de spatialisation. Cette carte met en évidence d'éventuelles voies d'amélioration dans le lissage des données spatiales.

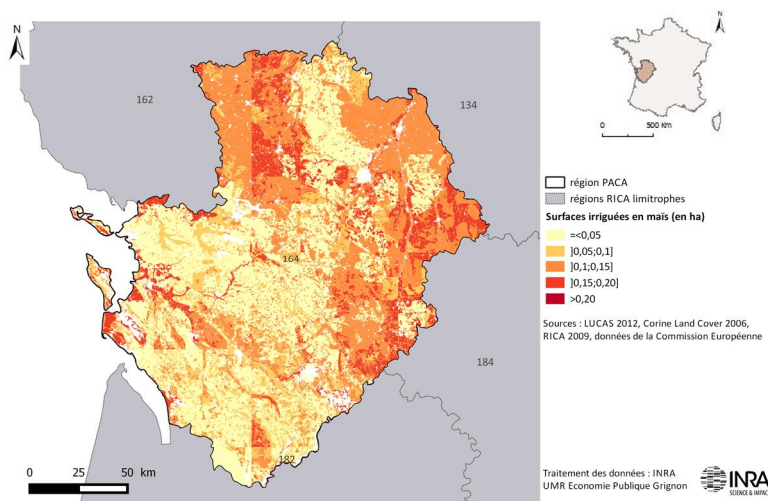


FIGURE 7. Part de surface pour la culture de maïs irrigué, Poitou-Charentes, 2009

4. Conclusion et perspectives

Compte tenu de la demande actuelle, des pressions exercées et de la menace potentielle du changement climatique sur l'évolution de la disponibilité en eau, la mise en place d'outils de modélisation appropriés apparaît indispensable à une gestion intégrée de la ressource. Selon cette optique, un modèle bioéconomique basé sur le couplage de deux outils (AROPAJ-STICS) et centré sur la relation rendements-intrants est adopté. La méthode d'intégration de l'intrant « eau » développée par Humblot (2016) est étendue. L'objectif est l'estimation de la demande d'irrigation d'une grande diversité de systèmes agricoles, dans un contexte de maximisation de leur marge brute, indépendamment d'une offre qui peut s'avérer limitante. De nombreuses variables, issues du traitement de multiples simulations, sont obtenues en sortie d'AROPAJ à différentes échelles (exploitation agricole,

bassin versant et/ou région). La force de cette étude est le développement de l'approche de spatialisation. La mobilisation de données physiques et de méthodes d'économétrie spatiale contribue à la désagrégation spatiale des résultats d'AROPAJ à une échelle fine. Cette démarche initialement développée par Chakir (2009) et Cantelaube *et al.* (2012) pour une version antérieure d'AROPAJ est étendue afin d'intégrer les parts de surfaces irriguées. Dans le champ des applications possibles, une attention particulière est accordée à l'étude de la demande en eau agricole de 2009 dans le but de donner un aperçu des diverses sorties du modèle. La réalisation de représentations cartographiques à l'échelle de la France illustre la grande capacité de la méthode à saisir la diversité régionale des systèmes agricoles. Cette analyse spatiale met en évidence l'existence de pratiques d'irrigation disparates d'une région à l'autre, principalement concentrées dans les parties ouest (Poitou-Charentes entre autres) et sud-est de la France. La forte demande qui caractérise ces zones se traduit par l'implantation de cultures gourmandes en eau (maïs, tournesol, colza etc.). A contrario, les régions moins consommatrices se définissent par la présence de prairie permanente et de blé tendre non irrigué. Un focus sur les surfaces irriguées en maïs dans la région Poitou-Charentes constitue une illustration du type de traitements possibles à une échelle plus fine. L'une des perspectives de cette étude est de poursuivre la démarche engagée à l'échelle européenne en intégrant le facteur climat et en étudiant l'impact de différentes politiques de régulation. Des analyses sont d'ores et déjà initiées pour différents scénarios de projection climatique à l'échelle de la France. Il s'agira dans la suite de ces travaux d'évaluer l'effet d'une adaptation des pratiques agricoles telles que des modifications en termes de choix des dates de semis et des variétés dans un contexte de changement climatique.

Bibliographie

- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierra J., Bertuzzi P., Burger P., Bussière F., Cabidoche, Y. M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J. P., Hénault C., Maraux F., Seguin B., Sinoquet, H. (2003). An overview of the crop models. *European Journal of Agronomy*, 18(364), 3096332.
- Cantelaube P., Jayet P. A., Carré F., Bamps C., Zakharov P. (2012). Geographical downscaling of outputs provided by an economic farm model calibrated at the regional level. *Land Use Policy*, 29(1), 35644.
- Chakir R. (2009). Spatial Downscaling of Agricultural Land-Use Data: An Econometric Approach Using Cross Entropy. *Land Economics*, 85(2), 2386251.
- Cortignani R., Severini S. (2009). Modeling farm-level adoption of deficit irrigation using Positive Mathematical Programming. *Agricultural Water Management*, 96(12), 178561791.
- Déqué, M., Dreveton, C., Braun, A., & Cariolle, D. (1994). The ARPEGE/IFS atmosphere model: a contribution to the French community climate modelling. *Climate Dynamics*, 10(465), 2496266.
- Eaufrance - Les prélèvements en eau en 2009 et leurs évolutions depuis 10 ans - <http://www.eaufrance.fr/ressources/documents/chiffres-statistiques-les>
- Godard C., Roger-Estrade J., Jayet P. A., Brisson N., Le Bas C. (2008). Use of available information at a European level to construct crop nitrogen response curves for the regions of the EU. *Agricultural Systems*, 97(162), 68682.
- Graveline N., Mérel P. (2014). Intensive and extensive margin adjustments to water scarcity in France's Cereal Belt. *European Review of Agricultural Economics*, 41(5), 7076743.
- Humblot P. (2016). *Impacts du changement climatique sur l'agriculture Européennes : vers une meilleure prise en compte de la ressource en eau dans la modélisation bio-économique*. Thèse en Sciences de l'environnement, AgroParis Tech.
- Humblot P., Jayet P.-A., Petsakos A. (2017). Farm-level bio-economic modeling of water and nitrogen use: Calibrating yield response functions with limited data. *Agricultural Systems*, 151, 47660.
- Janssen S. et van Ittersum M. K. (2007). Assessing farm innovations and responses to policies: a view of bio-economic farm models. *Agricultural Systems*, 94 : 6226636.
- Jayet P. A. et Petsakos A. (2013). Evaluating the efficiency of a uniform N-input tax under different policy scenarios at different scales. *Environmental Modeling and Assessment*, 18(1) : 57672.
- Kampas A., Petsakos A., Rozakis S. (2012). Price induced irrigation water saving: Unraveling conflicts and synergies between European agricultural and water policies for a Greek Water District. *Agricultural Systems*, 113, 28638.
- Larson D. M., Helfand G.E. et House B. W. (1996) Second-Best Tax Policies to Reduce Non point Source Pollution. *American Journal of Agricultural Economics*, 78(4) : 110861117
- Leclère D., Jayet P.-A., De Noblet-Ducoudré N. (2013). Farm-level Autonomous Adaptation of European Agricultural Supply to Climate Change. *Ecological Economics*, 87, 1614.
- Medellín-Azuara J., Howitt R. E. et Harou J. J. (2012). Predicting farmer responses to water pricing, rationing and subsidies assuming profit maximizing investment in irrigation technology. *Agricultural Water Management*, 108 : 73682.