

Modélisation agro-économique avec prise en compte de l'eau comme intrant

Delphine Barberis¹, Pierre Humblot¹, Pierre-Alain Jayet^{1*}, Anna Lungarska¹

¹ UMR Economie Publique INRA-AgroParisTech

* pierre-alain.jayet@inra.fr

Résumé

L'approche prospective, pluridisciplinaire engagée par l'Inra, à l'occasion de la phase VII du PIREN-Seine, repose essentiellement sur l'adaptation d'une modélisation agro-économique quantitative (couplage AROPAj-STICS). Il s'agit de mesurer les impacts du changement climatique sur l'agriculture en termes de variation des rendements, des besoins en intrants et des assolements. L'approche, initialement développée par Caroline Godard pour l'azote (2008), a été étendue à l'eau comme intrant agricole dans le cadre des travaux de thèse réalisés par Pierre Humblot (2016) (mise en place de fonctions dose-réponse à deux variables, définition d'une nouvelle typologie de groupes-types etc.). Diverses informations (marge brute, quantités d'eau et d'engrais consommées) sont obtenues à l'échelle de la France entière sur la base de projections climatiques fournies par le modèle ARPEGE-CLIMAT (de 2010 à 2100) dans le cadre de scénarios d'évolution proposés par le GIEC. Seules les sorties pour le scénario d'évolution A1b sont disponibles. Les calculs sont encore en cours de traitement pour les scénarios A2 et B1. Les premières simulations effectuées illustrent une augmentation probable de la demande en eau à l'horizon 2100.

En raison de la politique de confidentialité des données microéconomiques employées, la spatialisation précise des résultats obtenus est impossible au sein d'une région. Au cours de la phase VII du PIREN-Seine, l'approche initialement développée par R. Chakir (2009) et P. Cantelaube et al (2012), a été étendue dans le but d'intégrer les parts de surfaces irriguées des exploitations agricoles issues de la nouvelle typologie.

Ce présent rapport tend à illustrer le potentiel offert par le couplage AROPAj-STICS et, plus précisément, par l'intégration de l'eau comme intrant agricole. De nombreuses perspectives d'études sont envisagées pour la suite des travaux. Il s'agira d'introduire des scénarios d'augmentation des coûts d'accès à l'eau, d'analyser les effets d'une adaptation plus fine des pratiques agricoles, mais également de poursuivre la mise en œuvre d'un couplage avec des modèles hydrogéologiques.

1 Modélisation agro-économique et fonctions associant l'azote, l'eau et le rendement

1.1 Problématique

L'objectif fixé consiste à mesurer les impacts du changement climatique sur l'agriculture en termes de variation des rendements, des besoins en intrants et des assolements (entre cultures, prairies et fourrages). Une attention particulière est accordée à l'eau d'irrigation comme intrant dans le modèle AROPAj, en climats présent et futurs (sur un horizon 2100, par pas annuel depuis 2010, la dernière version calibrée du modèle étant associée à des données micro-économiques de 2009). On part du monde agricole tel qu'il est perçu par un modèle agro-économique pour proposer une analyse prospective ici centrée sur les relations entre climat, rendement et besoin en eau.

La démarche pluridisciplinaire engagée repose essentiellement sur l'adaptation d'une modélisation agro-économique quantitative, d'ores et déjà développée par l'INRA (Leclère et al. 2013, Godard et al. 2009). La méthode requiert l'utilisation d'AROPAj, un modèle d'offre agricole de programmation linéaire statique, et de STICS, un modèle de culture. La nouvelle dimension de l'eau est intégrée au couplage AROPAj-STICS dans le but de produire des fonctions dose-réponse à deux variables associant le rendement des cultures aux intrants "eau" et "azote". Il s'agit d'étendre l'approche initialement développée par Caroline Godard pour l'azote (2008). 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).

1.2 La méthodologie : élaboration de fonctions dose-réponse à 2 variables

L'utilisation du modèle de culture STICS a pour principal objectif d'associer à chacun des groupes type AROPAj et à chacune des principales cultures de vente, une relation inputs-rendement (plus précisément pour 8 des principales productions agricoles européennes en termes de ventes). Cette étape est décisive et permet d'améliorer sensiblement le modèle d'offre AROPAj. Rappelons que les groupes-types (ou fermes virtuelles) sont obtenus suite au regroupement par classification automatique des exploitations agricoles représentatives extraites des données d'enquêtes du RICA¹ 2009. Cette typologie contribue à diminuer la durée de traitement des calculs et respecte les règles de confidentialité propres au RICA. Elle repose sur la base de 4 critères (contre 3 pour la méthode de C. Godard) : l'OTEX², la part de surfaces irriguées, la taille économique et l'altitude.

Dans la pratique, il existe peu d'informations à l'échelle d'une ferme virtuelle susceptible d'alimenter le modèle de culture STICS (ex : le type de sol et la variété culturale sont inconnus). Par conséquent, une des principales difficultés est de réussir à associer à chaque groupe type et pour chaque culture la fonction de réponse la plus pertinente au vu des données de l'année 2009 prise comme référence pour le calibrage du modèle. Pour résoudre ce problème, un grand nombre de simulations STICS sont réalisées selon différentes modalités (ou paramètres) de cultures (type de sol, date de semis, précédent cultural et variétés utilisées). Au total, près de 2400 combinaisons sont testées pour chaque production d'un groupe type (contre 30 à 60 pour l'approche développée par C. Godard). Les apports en eau sont modulables pour les systèmes agricoles irrigués. Dans le cas contraire, l'apport est purement exogène (dépendant des conditions météorologiques). Il est possible d'imposer un stress hydrique et, ainsi, d'élaborer une « fonction » à 2 variables (azote et eau). L'étape finale consiste à sélectionner la fonction correspondante au jeu de paramètres le plus pertinent parmi un ensemble de surfaces éligibles. La méthode de C. Godard pour l'étape de calibrage est ainsi étendue en 3D et fait l'objet d'un article scientifique soumis à publication (P. Humblot et al, 2016, en révision). Elle permet de pallier la difficulté liée au manque de données concernant le prix de l'eau (utilisation d'un intervalle de valeurs potentielles). A partir du choix d'une forme fonctionnelle adaptée (Mitscherlich-Baule), la démarche repose sur l'emploi d'un critère économique et plus précisément sur la mesure de distance entre "un vecteur gradient" et "un vecteur prix", sous l'hypothèse de maximisation du profit des agriculteurs. La meilleure combinaison est celle qui minimise l'angle entre les deux vecteurs.

¹RICA : Réseau d'Information Comptable Agricole

²OTEX : Orientation Technico-Economique des Exploitations

Cette méthode est générique (extensible à tous les pays membres de l'UE). Une fois sélectionnés en temps présent, les paramètres STICS associés peuvent être modifiés, en particulier dans un contexte de changement climatique dès lors que l'on dispose d'information sur ce changement. Cela permet d'estimer la demande en eau en climat futur. Des fonctions de rendement sont ainsi produites sur la base de projections climatiques fournies par le modèle ARPEGE-CLIMAT (de 2010 à 2100) dans le cadre de scénarios d'évolution proposés par le GIEC. Trois scénarios sont sélectionnés et correspondent à différents niveaux de forçage radiatif (W/m²) : extrême (A2), moyen (B1) et intermédiaire (A1b) comparés à la tendance constante actuelle. Les données climatiques observées pour l'année 2009 sont utilisées pour la phase de sélection d'une fonction et des paramètres STICS inobservables (dans le sens que l'on ne peut a priori pas connaître ces paramètres, pour tout couple « groupe type / culture »).

Le changement climatique est considéré comme suffisamment progressif pour que les exploitants l'intègrent en temps réel dans leurs anticipations annuelles. En d'autres termes, pour chaque groupe-type, les agriculteurs choisissent la répartition de leurs surfaces en supposant "connus" les rendements finaux des cultures correspondant au climat probable de la période considérée. Il s'agit d'une forme d'adaptation autonome, dans la mesure où la marge par unité de surface d'une culture donnée est optimisée sur la base de la nouvelle fonction de rendement, et dans la mesure où l'assolement maximise le profit de l'exploitation agricole. En revanche, les modifications de dates de semis, les choix variétaux et la sélection de précédents culturaux font l'objet de scénarios spécifiques d'adaptation et seront traités séparément.

Il convient de rappeler que la méthode ainsi développée, par la nature du modèle, n'a pas de visée ni de valeur prédictive. Il s'agit plutôt d'un modèle à caractère prospectif. L'emploi de données climatiques résultant de simulations du modèle ARPEGE-CLIMAT, ou observées (pour l'année 2009), ne permet pas d'évaluer avec certitude l'évolution du climat de 2009 à 2100. En revanche, cela permet d'étudier l'impact d'une tendance et mieux encore l'impact de la variabilité interannuelle telle que simulée par le modèle climatique. Et dans le cas particulier de l'eau d'irrigation, la démarche ne vise pas à estimer une consommation précise à l'horizon 2100. Il s'agit, toutes choses égales par ailleurs, d'évaluer la demande en eau d'irrigation dans un contexte de maximisation de la marge brute des exploitations agricoles, en climats présent et futur, indépendamment d'une offre qui peut s'avérer limitante. Dans le but d'introduire la notion de "pression sur la ressource", des scénarios supplémentaires d'augmentation des coûts d'accès à l'eau seront simulés (en cours de réalisation).

1.3 Les résultats

La méthode développée ci-dessous est extraite des travaux réalisés par Pierre Humblot dans le cadre de sa thèse soutenue en mai 2016. Elle fait actuellement l'objet d'un article scientifique en révision pour publication (P. Humblot et al, 2016). Cette démarche permet d'estimer l'effet potentiellement négatif du changement climatique sur l'agriculture française de 2009 à 2050 considéré isolément (seul facteur de changement économique et physique). Elle met en évidence une baisse potentiellement significative de la marge agricole malgré les changements d'allocation des terres agricoles et malgré les ajustements des niveaux d'intrants à l'échelle de la parcelle. Les simulations réalisées indiquent également une hausse probable des besoins en eau d'irrigation en France (près du double pour les années les plus sèches), pour la majorité des années (à l'horizon 2050) et pour les 3 scénarios de changement climatique considérés (A1b, A2 et B1), ce qui ne préjuge en rien de l'offre d'irrigation. Par rapport au climat présent, il apparaît que le Nord de la France verrait un accroissement des besoins en eau, dans des régions où le pourcentage de terres irriguées est encore faible actuellement. Sous contrainte de l'offre en eau disponible, on devrait s'attendre à une baisse relative des rendements, ou à l'émergence d'autres systèmes de cultures ou d'assolements si cela s'avère plus profitable pour les producteurs.

Dans le travail de Humblot et al, 2016, les simulations réalisées ne s'étendaient que jusqu'en 2050. Afin de rendre compte de la variabilité temporelle et des événements extrêmes, la durée de simulation a été étendue à l'horizon 2100. Diverses informations (marge brute, quantités d'eau et d'engrais consommées) sont d'ores et déjà obtenues pour une période de temps plus étendue et à l'échelle de la France entière. Seules les sorties pour le scénario d'évolution A1b sont disponibles. Les calculs sont encore en cours de traitements pour les scénarios A2 et B1.

Au final, 3 séries de résultats ont été ou seront obtenues à l'échelle de la France entière:

- analyse de la valeur marginale de l'eau et des quantités d'eau irriguée des années 2009 à 2100
- étude des modifications d'usages des terres sous différents scénarios climatiques (par exemple réallocation entre cultures de blé et de maïs)
- estimation de l'effet du changement climatique sur les pollutions agricoles (gaz à effet de serre, pertes en nitrates etc.)

La comparaison des résultats simulés et de l'observation conduit à estimer les quantités d'eau prélevées dans les différentes régions de France. Dans le sud, l'évaluation est sous-estimée du fait que le modèle AROPAj n'intègre pas le maraîchage, l'arboriculture et la viticulture. Il peut également y avoir un écart entre ce qui est observé dans les statistiques et ce qui est effectivement prélevé (prélèvements « sauvages »). Dans le nord, la surestimation des quantités d'eau prélevées peut s'expliquer par les modalités de gestion quotidienne du stress hydrique par le modèle STICS, et par la variabilité des coûts et redevances qui pèsent sur l'eau d'irrigation. Il sera donc important de manipuler avec précaution les résultats que nous obtiendrons notamment dans le cas du bassin de la Seine. De façon globale, la méthode utilisée produit des quantités d'eau du bon ordre de grandeur aux échelles régionales et nationale.

À l'occasion de la 3^{ème} conférence annuelle de la FAERE à Bordeaux des 8-9 septembre 2016, les résultats (de 2009 à 2100) pour le scénario A1b furent présentés à l'échelle des régions Aquitaine, Centre et Midi-Pyrénées. L'obtention de valeurs sur le bassin versant de la Seine nécessite des étapes de traitements supplémentaires (cf. partie ci-dessous). Les premiers résultats ont été présentés dans le cadre du colloque annuel PIREN-Seine des 6-7 octobre 2016.

Outre la variabilité temporelle, nous avons pu également constater de fortes variations de valeurs d'une région à l'autre (ex : différence Nord-Sud). Par conséquent, la réalisation de cartes de sorties AROPAj, aussi bien à l'échelle de la France entière qu'au niveau d'un bassin spécifique du type de la Seine, est une étape primordiale pour rendre compte de cette variabilité spatiale.

2 Méthode de spatialisation géographique des sorties du modèle AROPAJ-STICS

En raison de la politique de protection des données individuelles du RICA, ne sont disponibles que des estimations de paramètres et des résultats aux échelles « groupe type d'exploitations » et « région ». L'exploitation de résultats utilisant la localisation géographique d'un individu de l'échantillon est interdite. A ce stade, l'accès à la localisation des groupes types est impossible. Il est cependant envisageable de mobiliser des données physiques et des méthodes d'économétrie spatiale pour en donner une localisation probabiliste, et donc de construire un calcul de spatialisation des sorties du modèle AROPAj.

Un module de spatialisation a donc été développé, dans le cadre des travaux de R. Chakir (2009) et P. Cantelaube et al (2012), afin d'estimer la contribution de chacun des groupes-types à l'activité agricole, à l'échelle du pixel. Cette procédure a été étendue, lors de la phase VII du PIREN-Seine, à la version V5 d'AROPAj (RICA 2009) dans le but d'intégrer les parts de surfaces irriguées des groupes-types issus de la nouvelle typologie (A. Lungarska 2016). Les informations sur l'eau sont extraites des données LUCAS³. Une grille régulière de 25 x 25 km est ainsi définie. Cette dernière a l'avantage d'être déjà intersectée avec les autres couches d'information 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 symbolise un plus fort risque d'abriter des groupes-types irrigués. Au final, la probabilité de présence de chacune des fermes virtuelles est évaluée en tenant compte des paramètres "irrigation" et "altitude". La figure suivante illustre un exemple, sur l'Ile de France, de résultats obtenus à la suite de la procédure de spatialisation des groupes types d'AROPAj.

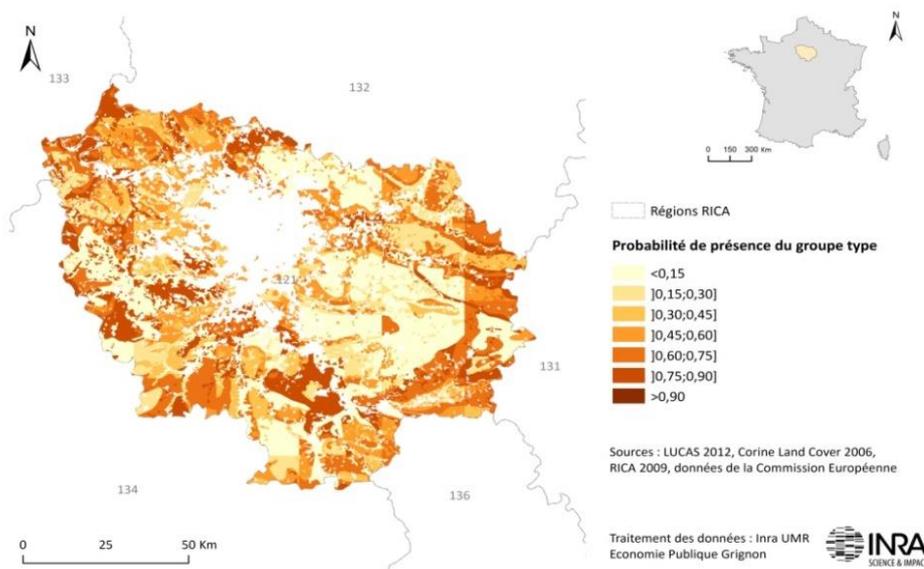


Figure 1 : Probabilité de présence du groupe-type 2 sur la région Ile de France

L'estimation de la contribution de chaque ferme virtuelle à l'activité agricole au sein de chaque région est indispensable à l'étape de désagrégation des sorties d'AROPAj à une échelle fine. Les différents résultats du modèle d'offre (ex: marge brute, volume demandé en eau d'irrigation ou quantité demandée d'engrais épandu) sont pondérés par les probabilités obtenues lors de l'étape précédente. Les algorithmes élaborés à l'occasion ont permis l'automatisation des calculs.

L'extraction des sorties AROPAj à l'échelle du bassin versant de la Seine est un processus complexe et a nécessité des étapes de calculs supplémentaires. L'essentiel de la procédure repose sur l'exclusion automatique des portions de régions non incluses dans le bassin (ex : région Centre) et la récupération des sorties AROPAj correspondantes (fonction clip en langage SIG). Dans le but de dresser un bilan global sur le bassin de la Seine, chaque valeur obtenue est ainsi pondérée à la surface des polygones inclus dans le bassin et issus de l'étape de spatialisation exposé ci-dessus. Les traitements sont en cours de réalisation.

³LUCAS : Land Use/Cover Area frame Survey

3 perspectives et conclusions

Étendre l'approche initialement développée pour l'azote à l'eau d'irrigation est une démarche complexe qui a permis de dessiner des tendances générales concernant la ressource en eau, en termes de demande d'irrigation, sur la période 2009-2050, à l'échelle de la France entière (thèse de Pierre Humblot). Des impacts potentiellement négatifs, en l'absence d'adaptation des pratiques agricoles, ont été ainsi mis en évidence (augmentation de la demande en eau, diminution de la marge brute etc.).

Grâce aux moyens de calcul disponibles, des simulations jusqu'à l'horizon 2100, pour le scénario d'évolution A1b, ont été réalisées dans le but d'étudier les effets de la variabilité interannuelle du climat. Les calculs pour le scénario A2 sont actuellement en cours de traitement et conduiront à élargir le spectre des impacts des scénarios climatiques. L'étude des nouveaux scénarios d'évolution du GIEC (RCP dans le cadre de l'AR5) est envisagée pour la suite des travaux.

Afin d'introduire la notion de "pression sur la ressource en eau", des scénarios supplémentaires d'augmentation des coûts d'accès à l'eau seront modélisés (en cours de réalisation). Les effets d'une adaptation plus fine des pratiques agricoles (ex: modification des dates de semis et des variétés), dans un contexte du changement climatique étendu (à l'horizon 2100) et en situation d'évolution des prix et des redevances pour l'eau d'irrigation, feront l'objet de nouvelles simulations.

Nous sommes actuellement en train d'exploiter les résultats obtenus sur les pertes en azote et les émissions de gaz à effet de serre à l'horizon 2100. Il pourrait également être envisagé de reprendre le thème de l'ozone comme polluant et d'étudier ses effets sur la productivité agricole (voir Humblot et al, 2013). Assez peu d'études se sont concentrées sur ce sujet. Une perspective de travail serait d'évaluer les impacts de l'ozone sur l'agriculture via la nouvelle version d'AROPAj intégrant les fonctions de rendement en réponse aux deux intrants eau et azote, le travail précédemment cité n'ayant porté que sur l'azote.

La procédure de spatialisation a contribué à l'obtention de cartes de sorties AROPAj à haute résolution. Au moyen de phases de calculs supplémentaires, des premiers résultats à l'échelle du bassin versant de la Seine ont été extraits pour le scénario A1b. Le développement de ce module de spatialisation devra être poursuivi l'année prochaine.

Enfin, la mise en œuvre du couplage avec les modèles hydrogéologiques sera réexaminée avec nos collègues de MinesParisTech et de Paris VI - Metis. Il s'agira d'étendre l'approche réalisée avec le modèle MODCOU (C. Bourgeois et al, 2016) en considérant l'eau sur les plans de la quantité (climat et irrigation) et de la qualité (pollutions en nitrate). Le modèle AROPAj intègre par défaut des fonctions d'émissions affines pour estimer les pertes azotées. Les moyens de calcul disponibles et la révision des modules consacrés aux pertes d'azote dans le modèle permettront de simuler les pertes annuelles sur un horizon « long », compatible avec l'asymptote donnée par un modèle hydrogéologique de l'hydro-système Seine (aquifères) jusqu'en 2100 (en association avec le modèle de climat). Il s'agira donc de réviser nos évaluations antérieures des concentrations futures. Rappelons à nouveau que tout cela relève d'approches à caractère prospectif, et qu'il ne s'agit en aucun cas de prévision.

Les ressources nécessaires pour la poursuite des travaux engagés : le projet bénéficiera de plusieurs mois supplémentaires de CDD d'ingénieur.

4 Références

- Bourgeois C., Jayet P.A., (2016), Regulation of relationships between heterogeneous farmers and an aquifer accounting for lag effects, *Australian Journal of Agricultural and Resource Economics*, 60, pp. 39–59. doi: 10.1111/1467-8489.12102
- Bourgeois C., Jayet P. A., Habets F., Viennot P. (2016). Estimating the Marginal Social Value of Agriculturally Driven Nitrate Concentrations in an Aquifer: A Combined Theoretical-Applied Approach. *Water Economics and Policy*, doi : 10.1142/S2382624X16500211.
- Cantelaube P., Jayet P. A., Carre 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), 35-44.
- Chakir, R. (2009). Spatial downscaling of agricultural land-use data: an econometric approach using cross entropy. *Land Economics*, 85(2), 238-251.
- Galko E. Modélisation de l'offre agricole européenne face à de nouveaux enjeux: réformes politiques, effet de serre et changement climatique. Thèse AgroParisTech, 2007
- Godard C. Modélisation de la réponse à l'azote du rendement des grandes cultures et intégration dans un modèle économique d'offre agricole à l'échelle européenne. Thèse AgroParisTech, 2005
- Humblot P. Impacts du changement climatique sur l'agriculture Européenne : vers une meilleure prise en compte de la ressource en eau dans la modélisation bio- économique. Thèse AgroParisTech, 2016
- Humblot P., Jayet P.A., Clerino P., Leconte-Demarsy D., Szopa S., Castell J.F., (2013), Assessment of ozone impacts on farming systems: a bio-economic modeling approach applied to the widely diverse French case, *Ecological Economics*, Volume 85, January 2013, pp 50–58
- Humblot P., Petsakos A., Jayet P.A. (2016), Farm-level bio-economic modeling of water and nitrogen use: calibrating yield response functions with limited data, en révision
- Jayet et al (2016), The European agro-economic AROPAj model, 170p, free access: https://www6.versailles-grignon.inra.fr/economie_publicue/Publications (page: "Documentation Aropaj")
- Leclère D. Offre agricole Européenne et changement climatique : une exploration régionale des enjeux liés aux changements d'échelle par la modélisation intégrée. Thèse AgroParisTech, 2012.
- Leclère D., Jayet P.A., De Noblet Ducoudré N., (2013), Farm-level autonomous adaptation of European agricultural supply to climate change, *Ecological Economics*, Volume 87, March 2013, pp 1-14.