

Évaluation en partenariat des stratégies d'irrigation en cas de restriction des prélèvements dans la nappe de Beauce (France)

Sami Bouarfa¹
Laurent Brunel²
Jacques Granier³
Jean-Claude Mailhol¹
Sylvie Morardet¹
Pierre Ruelle¹

¹ Cemagref
UMR G-EAU
BP 5095
365, rue JF Breton
34196 Montpellier
France
<sami.bouarfa@cemagref.fr>
<jean-claude.mailhol@cemagref.fr>
<sylvie.morardet@cemagref.fr>
<pierre.ruelle@cemagref.fr>

² Diataé
3191, route de Mende
34093 Montpellier cedex 5
France
<laurent.brunel@diatae.com>

³ Cemagref
UMR G-Eau
3275, route Cezanne
CS 40061
13182 Aix-en-Provence cedex 5
France
<jacques.granier@cemagref.fr>

Résumé

La nappe de la Beauce est l'un des rares aquifères faisant l'objet en France d'une gestion volumétrique négociée entre la profession agricole et l'Administration. Depuis 1999, des volumes de référence sont alloués à chacune des quelque 3 600 exploitations agricoles, réparties sur six départements, qui prélèvent de l'eau à usage agricole dans l'aquifère. Chaque année, les volumes prélevables sont définis par l'application aux volumes de référence d'un coefficient de réduction en fonction du niveau piézométrique moyen. Depuis 2003, la décroissance du niveau de la nappe a conduit à une diminution importante des volumes prélevables et présage d'un avenir difficile. Cet article présente une démarche développée avec les acteurs pour analyser les adaptations et leurs conséquences agronomiques et économiques dans des contextes, pour l'heure hypothétiques, de forte décroissance des volumes prélevables.

Mots clés : approches participatives ; eau souterraine ; France ; irrigation.

Thèmes : eau ; économie et développement rural ; ressources naturelles et environnement.

Abstract

Evaluation of irrigation strategies in partnership in the case of withdrawal limitations in the Beauce aquifer (France)

The Beauce aquifer (France) is one of the few subjected to volumetric management resulting from a negotiation between farmers and the administration. Since 1999, a quota has been allocated to each of the 3,600 irrigated farms located on six administrative counties. Each year, quotas are weighted by a coefficient of reduction linked to the average piezometric level. The decrease in the level since 2003 has led to a reduction of withdrawal permission with uncertainties for the future. This paper presents an approach developed with actors to analyze their adaptations and the agronomic and economic consequences of a thus far hypothetical substantial reduction in irrigation quantities.

Key words: France; groundwater; irrigation; participatory approaches.

Subjects: economy and rural development; natural resources and environment; water.

Les eaux souterraines constituent la principale source d'eau douce pour la planète. Selon l'Unesco (2009), elles fournissent plus de 20 % des besoins mondiaux. Elles

sont dans la plupart des cas sujettes à des prélèvements diffus réalisés par un grand nombre d'usagers, notamment agricoles, qui ont un accès direct individuel à la nappe. Les eaux

Pour citer cet article : Bouarfa S, Brunel L, Granier J, Mailhol JC, Morardet S, Ruelle P. 2011. Évaluation en partenariat des stratégies d'irrigation en cas de restriction des prélèvements dans la nappe de Beauce (France). *Cah Agric* 20 : 124-9. doi : 10.1684/agr.2010.0461

Tirés à part : S. Bouarfa

doi: 10.1684/agr.2010.0461

souterraines sont invisibles, donc difficiles à appréhender aux plans qualitatif et quantitatif pour ses usagers et ses gestionnaires, ce qui les expose au risque de « tragédie des communs » décrit par Hardin (1968).

Dans de nombreuses régions du monde, la majeure partie des forages n'est pas déclarée et/ou contrôlée, rendant difficile la mise en place de mécanismes de gestion. Les dispositifs légaux, juridiques et institutionnels spécifiques pour la gestion de telles ressources tardent souvent à se mettre en place. Montginoul (2011) fait état du peu d'expériences documentées de mise en place d'instruments formels pour gérer les ressources souterraines et s'inspirent des instruments de réduction des pollutions diffuses agricoles pour proposer de nouveaux outils. Paradoxalement, c'est dans des situations où l'agriculture revêt un caractère informel que la problématique de la gestion des nappes est la plus documentée. Il s'agit aussi de régions à climat aride où la pression exercée sur la ressource est forte. En Inde, Shah (2008) analyse l'importance de la ressource souterraine pour l'économie agricole, par comparaison avec les systèmes de distribution collectifs. Il propose des instruments de régulation essentiellement fondés sur la recharge artificielle des nappes et sur un contrôle des prélèvements *via* la gestion d'un réseau électrique propre aux forages (Shah *et al.*, 2008). Au Mexique (Sandoval, 2004), en Algérie et au Maroc (Bekkar *et al.*, 2009 ; Hammani *et al.*, 2009), des approches participatives ont été conçues pour tenter d'élaborer des règles de gestion avec les utilisateurs des nappes. Mais dans ces différentes situations documentées, aucune des règles de gestion des nappes n'est encore en application.

Selon Petit (2004), l'idée selon laquelle les marchés de l'eau seraient une voie pour réguler l'usage des ressources, en particulier souterraines, est souvent avancée par les économistes, mais peu d'expériences concluantes ont été pour l'heure mises en œuvre. En Beauce, des réflexions ont émergé, lors de la mise en place du système de gestion volumétrique de la nappe, sur d'éventuels mécanismes de redistribution des quotas *via* des marchés (Kosciusko-Morizet *et al.*, 1999 ; Strosser et Montginoul, 2001). Si de

tels marchés ne sont pas mis en place, la nappe de Beauce est cependant l'un des rares cas où un système de « gestion volumétrique » est fonctionnel. Celui-ci repose sur des volumes prélevables définis chaque année pour l'irrigation en fonction du niveau de la nappe.

La nappe de Beauce est de grande dimension : elle s'étend sur près de 10 000 km², six départements, deux régions et deux bassins hydrographiques qui relèvent de deux agences de l'eau (Loire-Bretagne et Seine-Normandie). C'est une ressource stratégique pour l'agriculture et l'alimentation en eau potable. La baisse de son niveau piézométrique, observée au début des années 1990, et l'assèchement associé des rivières ont suscité de nombreux débats qui ont conduit à la mise en place, par la négociation, de plusieurs dispositifs destinés à réguler les prélèvements (Petit, 2009). L'analyse de l'utilisation de la ressource a conclu à une forte influence des prélèvements destinés à l'irrigation sur le niveau piézométrique de la nappe (Bruand *et al.*, 1997 ; Bonnal et Favard, 1999). Dans ce contexte, la mise en place depuis 1999 d'une gestion volumétrique des prélèvements sur la nappe de Beauce visait à éviter la gestion de crise au profit d'une gestion préventive des sécheresses (Verjus, 2008). Néanmoins, la nappe a continué à baisser de façon continue depuis 2003. Cela a conduit, en 2008, à des volumes d'eau prélevables historiquement bas, correspondant à 45 % des quotas initiaux.

Dans cet article, nous présentons une approche participative conduite avec les agriculteurs des départements d'Eure-et-Loir et du Loiret où se concentrent la grande majorité des prélèvements. Ce travail a été réalisé en partenariat avec la profession agricole et l'Administration pour évaluer les conséquences sur les revenus agricoles d'éventuelles nouvelles restrictions, dans l'hypothèse d'une poursuite de la baisse de la nappe et donc de restrictions en eau de plus en plus drastiques.

Matériel et méthode

L'approche participative s'est appuyée sur une typologie des exploitations agricoles de Beauce construite sur la

base des assolements et des consommations en eau. Trois ateliers de simulation de scénarios ont été conduits correspondant à chaque type d'exploitation. Une modélisation agronomique et économique a ensuite été mise en œuvre pour évaluer les conséquences des restrictions d'eau.

Construction d'une typologie d'exploitations agricoles

La typologie des exploitations est construite à partir du fichier PAC « outils de gestion des aides », géré par l'Administration, qui recense les exploitations et leur assolement ainsi que des informations relatives aux cultures irriguées. Sur un total de 4 117 exploitations représentant une surface agricole utile (SAU) totale de 430 450 hectares, 2 670 utilisent l'irrigation et exploitent près de 80 % de cette SAU. Une analyse en composantes principales réalisée sur la base de la composition de l'assolement des exploitations (en Beauce, l'élevage est peu important), suivie d'une classification hiérarchique a conduit à distinguer quatre grands types d'exploitations agricoles irriguées (*figure 1*). Toutes quatre ont un assolement composé d'au moins 50 % de céréales à paille (céréales d'hiver et orge de brasserie), mais elles se distinguent par leurs têtes d'assolement : colza, maïs betterave, ou légumes.

Les données de marges brutes par culture, de charges de structures courantes, de primes couplées et non couplées par exploitation type sont issues du Réseau d'Observation des Systèmes Agricoles en région Centre (réseau ROSACE) géré par les chambres d'agriculture, ainsi que de l'Observatoire économique des exploitations agricoles d'Eure-et-Loir. La rentabilité de chaque exploitation type, mesurée par son excédent brut d'exploitation (EBE), a été calculée sur la base des cultures des exploitations de ce type.

Volumes d'eau alloués annuellement

Le volume d'eau prélevable annuellement sur la nappe de Beauce est fixé à 525 millions de m³ par an en situation de nappe haute. Chaque exploitation bénéficie d'un volume d'eau de référence fixé en 1999 lors de la mise en

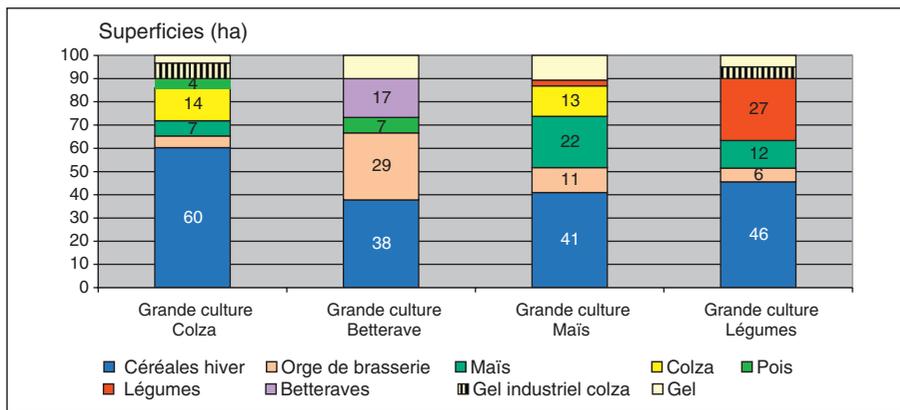


Figure 1. Les assolements des quatre exploitations types.

Figure 1. Cropping pattern of the four farm types.

application du protocole de gestion volumétrique. Ce quota a été attribué principalement en fonction de la taille de l'exploitation, des cultures pratiquées à l'époque, et du type de sol. Un arrêté préfectoral fixe chaque année un coefficient réducteur selon le niveau moyen de la nappe établi à partir d'un réseau de piézomètres. L'arrêté est pris juste avant le démarrage de la campagne d'irrigation au mois d'avril. L'agriculteur élabore une stratégie d'irrigation et l'adapte en fonction du climat de l'année et de son volume prélevable. Depuis 1999, le coefficient de réduction a évolué entre 0,955 et un minimum de 0,45 (campagne 2008).

Caractérisation des consommations en eau

Une base de données « eau », créée en 1999 répertorie annuellement pour chaque exploitation le volume d'eau prélevable, et la consommation totale déclarée par l'exploitant. Les analyses réalisées sur cette base de données indiquent un volume de référence moyen d'environ 1100 m³/ha de SAU pour les deux premiers types d'exploitations (colza et betterave) et 1300 m³/ha de SAU pour les deux autres types (maïs et cultures spéciales). Les écarts types varient de 170 à 220 m³/ha selon le type d'exploitation. Une vingtaine d'enquêtes individuelles a été réalisée en 2007 sur l'ensemble de la zone pour caractériser les consommations d'eau. L'enquête s'est focalisée sur les pratiques d'irrigation de chaque culture en 2006, année caractérisée par

un printemps et un été secs. Les consommations en eau variaient de 400 m³/ha de SAU à 950 m³/ha de SAU selon le type d'exploitation.

Face à d'éventuelles restrictions en eau, deux sortes d'adaptations sont envisagées :

- la réduction des apports d'eau d'irrigation aux cultures ;
- la modification de l'assolement prévu à la fin de l'été précédant la campagne d'irrigation.

Les enquêtes ont aussi montré que les quotas d'eau initialement négociés par la profession agricole étaient confortables pour la plupart des exploitations, avec toutefois des hétérogénéités de marge disponible. Soulignons que cette marge fut pour les agriculteurs un élément important pour accepter la mise en place de la gestion volumétrique. Elle a ensuite été revue à la baisse car, depuis 2006, le volume de référence est plafonné à 80 % du volume initialement négocié.

Ateliers d'évaluation de scénarios par groupes

Un comité de pilotage constitué par l'Administration, la profession agricole, la commission locale de l'eau et l'institut de recherche en sciences et technologies pour l'environnement (Cemagref) a été constitué. Ce comité a défini des scénarios contrastés combinant des niveaux de restriction, des conditions climatiques, des prix de vente, et des sols. Ces scénarios ont été préalablement définis à partir des éléments suivants :

- deux coefficients de réduction de nappe : 0,4 et 0,2 (ce dernier correspondant à une situation extrême de 80 % de restriction) ;
- quatre années climatiques contrastées en fonction de la pluviosité du printemps et de l'été ;
- des prix de vente des principales cultures (haut, moyen et bas) ;
- des sols superficiels (réserve utile de 70 mm) et moyens (110 mm) représentatifs de la zone.

Nous avons conçu des ateliers d'évaluation de ces scénarios avec un double objectif :

- préciser les adaptations de nature « stratégiques » (changements d'assolement) et « tactiques » (réduction des apports d'eau) face à des restrictions d'eau ;
- et en évaluer les impacts économiques.

Trois ateliers d'une demi-journée chacun se sont tenus : un atelier « maïs et colza », cultures assez proches au plan économique et non liées par contrat à des filières ; un atelier « betterave » et un atelier « légumes ». Une dizaine de personnes ont participé à chaque atelier (agriculteurs, conseillers irrigation des chambres d'agriculture et experts filières). Il s'agissait de personnes différentes pour chaque atelier car elles étaient identifiées par les chambres d'agriculture pour leur expertise concernant le type d'exploitation traité (figure 2).

Les ateliers se sont déroulés en trois étapes :

1. Après une présentation générale des acquis antérieurs (typologie des exploitations, résultats d'enquêtes) et des objectifs des simulations proposées, les participants ont analysé collectivement l'exploitation type, ajustant si nécessaire, son assolement et ses besoins en eau sans restrictions d'eau (tableau 1) ;
2. Les assolements ont ensuite été reconsidérés dans un contexte de restriction progressive de la ressource (avec un coefficient de 0,4 puis de 0,2) ;
3. L'étape suivante a consisté à simuler le déroulement d'une campagne d'irrigation pour une année climatique donnée, comme en situation réelle. Les agriculteurs connaissaient leur volume d'eau disponible mais non le climat à venir. Pour simuler la campagne d'irrigation, les animateurs ont annoncé une succession chronologique de couples d'événements : la



Figure 2. Atelier avec les agriculteurs de la Beauce.

Figure 2. Workshop with Beauce farmers.

date et la hauteur (en mm) des pluies associées à une prévision météorologique, d'une part, et les conseils d'irrigation (date et dose) par culture

simulés à l'aide du modèle PILOTE (Mailhol et Olufayo, 1997), d'autre part. Dans la simulation, les agriculteurs pouvaient réaliser des arbitrages

sur les cultures à irriguer. En cas de manque d'eau, ils pouvaient diminuer la dose conseillée, décaler la date d'apport, voire diminuer la surface irriguée et sacrifier tout ou partie de la sole d'une culture. Les événements et les décisions prises par le groupe étaient enregistrés dans une feuille de calcul pour calculer rapidement des indicateurs : total des pluies entre deux dates, solde du volume d'eau disponible, etc. La *figure 3* illustre la nature des résultats obtenus à l'issue d'une campagne.

Évaluation des impacts pour les différents scénarios

Les résultats des simulations de groupe ont été traités *ex post* pour évaluer les conséquences agronomiques des restrictions d'irrigation. Les rendements ont été évalués à l'aide du modèle PILOTE calé sur les espèces et les références expérimentales locales des partenaires de l'étude (Institut technique de la betterave [ITB], chambres d'agriculture, Arvalis-Institut du végétal). Les rendements simulés ont servi à calculer l'EBE dans chaque exploitation type à l'aide des modèles technico-économiques. Les résultats

Tableau 1. Support de discussion résumant les étapes 1 (assolement de référence sans restrictions d'eau) et 2 (assolement modifié pour un coefficient de nappe de 0,4).

Table 1. Discussion support summarizing 1 (crop rotation with no water reduction) and step 2 (modified crop rotation with a groundwater coefficient of 0.4).

EXPLOITATION TYPE : Grandes cultures~maïs/colza								
VOLUME DE RÉFÉRENCE :		114 500 m ³						
COEFF NAPPE :		0,40						
		VOLUME DISPONIBLE : 45 800 m ³						
Type culture	HIVER				ÉTÉ			
Cultures	COLZA	BLÉ TENDRE	BLÉ DUR	ORGE PRINTEMPS	MAÏS	GEL		
Date : semis/récolte	25-août/3-juillet	20-oct/25-juillet	01-nov/08-juillet	01-mars/20-juillet	10-avril/20-sept			
Rdt objectif (qx/ha)	35	85	65	70	110			
Besoin en eau en année sèche (m ³ /ha)	en sec	600	900	700	1 800			
MB hors DPU (euros/ha)	399,6	728,6	587,1	769,8	754,8	90	SAU	
Assolement référence (ha)	13	25	16	11	25	10	100	Référence
Assolement modifié (ha)	25	25	20	11	12	7	100	Objectif

Consommation en eau	
Assolement de référence	82 100 m ³
Assolement modifié	62 300 m ³

SAU : surface agricole utile ; MB : marge brute ; DPU : droits à paiement unique.

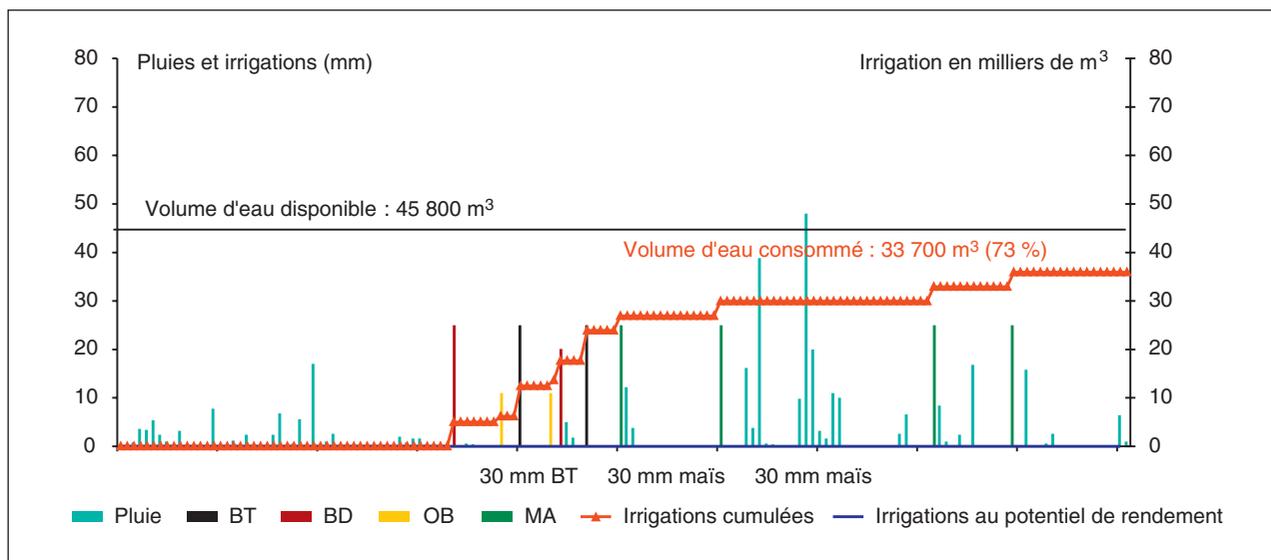


Figure 3. Représentation d'une simulation d'une campagne d'irrigation sur différentes cultures dans le cas d'un printemps sec et d'un été pluvieux où le volume d'eau consommé correspond à 73 % du volume prélevable.

Figure 3. Representation of a simulated irrigation campaign on different crops during a dry spring and a wet summer where 73% of the total authorised volume is consumed.

BT : blé tendre ; BD : blé dur ; OB : orge de brasserie ; MA : maïs.

ont été discutés par l'ensemble des participants lors d'une réunion de restitution un mois après la tenue des trois ateliers.

Résultats

Réduction des volumes alloués à 40 % des quotas initiaux

Pour une restriction à 0,4, les agriculteurs ont principalement réagi par une adaptation tactique en réduisant les doses d'irrigation. Quelle que soit l'orientation de l'exploitation, l'utilisation du volume disponible était raisonnée sur l'ensemble de la sole irriguée, avec une répartition prévisionnelle de la quantité d'eau pour satisfaire en priorité les cultures d'été, à plus forte plus-value (maïs) ou sous contrat (légumes ou betteraves). L'irrigation de printemps était, au besoin, restreinte pour sécuriser l'irrigation d'été. Mais si l'été s'avérait humide, une partie du volume disponible n'était pas utilisée. L'existence d'un tel volume, dénommé « volume mort » n'était donc pas synonyme d'une sous-utilisation structurelle du volume d'eau alloué mais d'une gestion rationnelle du volume prélevable.

Réduction drastique des volumes alloués à 20 % des quotas initiaux

Certains agriculteurs ont refusé d'envisager ce scénario considéré comme inacceptable. Les autres ont profondément modifié la structure de production de leur exploitation pour s'adapter à cette restriction.

Dans les trois exploitations types, les cultures d'été ont été réduites au strict minimum :

- le maïs a disparu des assolements ;
- un seul type de légumes a été maintenu là où il pouvait y en avoir plusieurs et les surfaces ont été divisées par trois (de 30 hectares à 10 hectares dans l'exemple traité) ;
- la betterave à sucre associée à un quota de production a été conservée aux dépens du colza industriel, sans quota ;
- le pois protéagineux a disparu car il nécessitait d'être arrosé, mais bénéficiait d'une marge plus faible ;
- l'orge diminuait fortement car il nécessitait d'être irrigué pour atteindre un taux de protéine précis dans les grains afin d'être valorisé en brasserie. Des successions simplifiées de type colza/blé tendre/blé dur ont réapparu. De manière générale, la proportion de céréales d'hiver, blé tendre et blé dur,

a augmenté. Enfin, la simplification des assolements a été d'autant plus drastique que les sols étaient superficiels et les cultures vulnérables à la sécheresse.

Des impacts économiques dépendant des prix, de l'année climatique et du coefficient de restriction

Dix-huit simulations ont été réalisées au cours des trois ateliers. Le climat de l'année 2006 (printemps et été secs) a constitué un accident climatique où l'irrigation ne jouait plus son rôle d'assurance sécheresse, même avec un coefficient de 0,4. Les EBE dégagés n'ont pas permis de rembourser les charges d'emprunts des exploitations. En situation de prix défavorables, les EBE sont devenus négatifs. Par ailleurs, les simulations ont montré un impact important des sols sur les EBE. En revanche, dans certaines situations de restriction, les années moins sèches présentent de meilleurs résultats que les valeurs de référence, du fait que les rendements calculés par le modèle de culture sont plus élevés que les rendements objectifs des agriculteurs. Dans l'évaluation collective des rendements

objectifs, on peut néanmoins supposer que les agriculteurs se sont implicitement placés dans des conditions moyennes, voire défavorables, au niveau des sols et du climat, intégrant par là même une forme de risque. La contrainte réglementaire lorsqu'elle est modérée n'induit donc pas dans tous les cas des pertes financières mais fragilise les exploitations.

Conclusion

La gestion de la nappe de Beauce s'effectue depuis dix ans grâce à la définition annuelle de volumes prélevables. Nos simulations de groupe ont démontré que les irrigants ont intégré cet outil, fruit d'une coconstruction entre profession agricole et Administration. Les agriculteurs peuvent ainsi gérer un volume d'eau et réaliser des arbitrages entre cultures de printemps et d'été en fonction du climat de l'année.

La gestion d'un volume prélevable amène à des paris sur le climat, qui peuvent conduire parfois à ne pas consommer tout le volume en cas d'été humide par exemple, ce dont il ne faut pas tirer de conséquences hâtives en termes de volume d'eau alloué. En un sens, l'outil de gestion rend la nappe souterraine « visible » au même titre que l'utilisation d'une ressource de surface stockée dans un barrage ou un lac collinaire et les comportements observés s'apparentent à ceux décrits sur ce type de ressource par Leroy *et al.* (1997).

Dans les scénarios étudiés, les restrictions en eau (coefficient de 0,4 puis 0,2) ont des conséquences économiques importantes les années sèches (printemps et été) sur tous les systèmes de production étudiés. Il est à prévoir que ces impacts se répercutent sur les filières locales de production, ce qui n'a pas été étudié dans le cadre de cette étude.

Quelles améliorations du système proposer ? Raisonner en termes de priorités de prélèvement pour certaines cultures ne nous apparaît pas adapté. En revanche, deux conditions nous semblent devoir être impérativement réunies. Tout d'abord, le volume d'eau

disponible pour l'année devrait être connu beaucoup plus tôt dans la campagne, au moment du choix de l'assolement qui constitue la première adaptation stratégique permettant de limiter les risques. Deuxièmement, le volume doit être garanti et donc pouvoir être utilisé quel que soit le moment de l'année, c'est-à-dire sans arrêts sécheresse. Par ailleurs, la mise en place d'échanges de quotas entre irrigants nous paraît une piste de réflexion intéressante au stade actuel où la profession agricole s'est approprié le principe de gestion volumétrique et dans la perspective d'un transfert de gestion auprès d'un organisme unique. L'approche participative mise en œuvre s'est révélée efficace car elle a été combinée avec des outils de modélisation agronomique et économique. Elle a ainsi permis de quantifier les conséquences des restrictions d'eau et de les mettre en débat. Les résultats ont fait apparaître la complexité des prises de décision et les faibles marges de manœuvre des agriculteurs auprès des autres acteurs du territoire en dehors du monde agricole. Le refus exprimé par certains agriculteurs d'envisager le scénario de restriction à 0,2 illustre bien que ce type de démarche puisse être pris au sérieux par la profession agricole et dépasse le simple exercice pédagogique. ■

Remerciements

Cette étude a bénéficié du financement de la direction régionale de l'Alimentation, de l'Agriculture et de la Forêt (DRAF) Centre et de la préfecture de la région Centre. Les auteurs remercient les conseillers irrigation des chambres d'agriculture des départements d'Eure-et-Loir et du Loiret, les instituts techniques (Arvalis, ITB, sucrerie de Toury, FDGetal) pour leur collaboration ainsi que les agriculteurs qui ont participé aux ateliers. Les auteurs remercient également le bureau d'études Lisode pour l'aide à la conception des ateliers.

Références

Bonnal L, Favard P, 1999. Prévisions à court terme du niveau des aquifères : le cas de la nappe de

Beauce. *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales* 53 : 75-91.

Bekkar Y, Kuper M, Errahj M, Faysse N, Gafsi M, 2009. On the difficulty of managing an invisible resource: farmers' strategies and perceptions of groundwater use, field evidence from Morocco. *Irrigation and Drainage* 58 : S252-63.

Bruand A, Creusot G, Quéting P, Darthout R, Raison L, Courtemanche P, *et al.*, 1997. Variabilité de la recharge de la nappe de Beauce : Rôle de l'irrigation et des caractéristiques du sol. *Etude et Gestion des Sols* 4 : 229-45.

Hammani A, Hartani T, Kuper M, Imache A, 2009. Paving the way for groundwater management: transforming information for crafting management rules. *Irrigation and Drainage* 58 : S240-51.

Hardin G, 1968. The tragedy of the commons. *Science* 162 : 1243-8.

Kosciusko-Morizet N, Richard V, Lamotte H, 1999. Que peut-on attendre de la mise en place de quotas individuels échangeables de prélèvements sur la ressource en eau en France ? L'exemple de l'agriculture irriguée. In : Falque M, Massenet M, eds. *Droits de propriété, économie et environnement. Les ressources en eau*. Paris : Dalloz.

Leroy P, Deumier JM, Jacquin C, 1997. IRMA : un simulateur de l'organisation des chantiers d'irrigation. *Persp Agric* 228 : 76-83.

Mailhol JC, Olufayo AA, Ruelle P, 1997. Sorghum and sunflower evapotranspiration and yield from simulated leaf area index. *Agricultural Water Management* 35 : 167-82.

Montginoul M, 2011. Des accords entre parties prenantes pour gérer l'impact des prélèvements agricoles individuels dans les nappes phréatiques ? Les enseignements de trois cas de gestion des pollutions diffuses. *Cah Agric* 20 : 130-5. doi: 10.1684/agr.2010.0466.

Petit O, 2004. La surexploitation des eaux souterraines : enjeux et gouvernance. *Natures Sciences Sociétés* 12 : 146-56.

Petit O, 2009. Un regard rétrospectif sur l'évolution de la gouvernance de l'irrigation en Beauce (1993-2008). *Secheresse* 20 : 262-70. doi: 10.1684/sec.2009.0194.

Sandoval R, 2004. A participatory approach to integrate aquifer management: the case of Guanajuato state, Mexico. *Hydrogeology J* 12 : 6-13.

Shah T, Bhatt S, Shah RK, Talati J, 2008. Groundwater governance through electricity supply management: Assessing an innovative intervention in Gujarat, western India. *Agricultural Water Management* 95 : 1233-42.

Shah T, 2008. *Taming the anarchy: Groundwater governance in South Asia*. Washington (DC) : Resources for the Future Press.

Strosser P, Montginoul M, 2001. Vers des marchés de l'eau en France ? Quelques éléments de réflexion. *Annales des Mines, Responsabilité et Environnement* (23) : 13-31.

Unesco, 2009. *The third United Nations World Water Development Report: Water in a Changing World*. WWDR-3. <http://www.unesco.org/water/wwap/wwdr/wwdr3/>.

Verjus P, 2008. Élaboration du SDAGE du bassin Seine Normandie relatif à la gestion de la rareté de la ressource en eau. *La Houille Blanche* 3 : 45-50.