



The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library

This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.

Help ensure our sustainability.

Give to AgEcon Search

AgEcon Search
<http://ageconsearch.umn.edu>
aesearch@umn.edu

Papers downloaded from AgEcon Search may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.

No endorsement of AgEcon Search or its fundraising activities by the author(s) of the following work or their employer(s) is intended or implied.

Estimation de la demande en eau d'irrigation sous incertitude

M. Christophe Bontemps, M. Stéphane Couture, Monsieur Pascal Favard

Résumé

Dans cet article, nous considérons un agriculteur averse au risque, évoluant dans un contexte d'incertitude climatique, face à des décisions séquentielles d'irrigation. Dans ce cadre complexe, notre but est d'estimer la demande en eau d'irrigation. L'originalité de ce travail est d'une part, d'intégrer un modèle biophysique (EPIC-Phase), dans un modèle de programmation et d'autre part d'utiliser les méthodes non-paramétriques d'estimation. Au prix de cette complexité, nous invalidons les résultats de la littérature. En effet, la demande en eau d'irrigation que nous obtenons n'est pas convexe, ce qui devrait avoir des implications en termes de politique de l'eau.

Abstract

Irrigation water demand estimation - In this paper, we consider a risk adverse farmer, facing sequential irrigation decisions under climatic uncertainty. In this complex framework, our goal is to estimate the irrigation water demand. The originality of this work lies, first, in the integration of a bio-simulation model (EPIC-Phase) into a programming model and, second, in the nonparametric estimation methods used. As a result we invalidate the literature's results on the subject. The irrigation water demand we get is not convex, which should have implications in terms of water policy.

Citer ce document / Cite this document :

Bontemps Christophe, Couture Stéphane, Favard Pascal. Estimation de la demande en eau d'irrigation sous incertitude. In: Économie rurale. N°276, 2003. pp. 17-24;

doi : <https://doi.org/10.3406/ecoru.2003.5421>

https://www.persee.fr/doc/ecoru_0013-0559_2003_num_276_1_5421

Fichier pdf généré le 09/05/2018

Estimation de la demande en eau d'irrigation sous incertitude

Christophe BONTEMPS • INRA Économie et sociologie rurales, Université de Toulouse

Stéphane COUTURE • UMR ENGREF-INRA, Laboratoire de recherche en Économie forestière (LEF), Nancy

Pascal FAVARD • Université de La Rochelle et Laboratoire d'économie de l'environnement et des ressources naturelles (LEERNA), Toulouse

L'estimation de la demande en eau d'irrigation n'est pas un problème récent pour les économistes (Coman, 1911). La multiplication des conflits d'usage, en ce qui concerne l'eau, ces dernières années, a entraîné une forte augmentation des tentatives d'estimation de la demande en eau d'irrigation. Pour schématiser, d'un monde où l'eau est gratuite pour les agriculteurs et donc sans doute consommée de façon sous-optimale – socialement s'entend – pourrait-on passer dans un monde où les agriculteurs paieraient à son « *juste prix* » le facteur eau ? Avant de déterminer ce juste prix de l'eau ce qui, bien que théoriquement assez simple, est concrètement très compliqué, il faut estimer la fonction de demande en eau d'irrigation de l'agriculteur. Deux approches sont employées dans la littérature pour déterminer cette demande. Si les quantités de facteur, l'eau d'irrigation dans notre cas, sont observées alors un modèle économétrique plus ou moins complexe peut être utilisé (Ogg et Gollehon, 1989 ; Moore *et al.*, 1994 ; Belhaj-Hassine et Thomas, 2001).

Malheureusement en France, comme dans beaucoup de pays, ces données, quand elles sont disponibles, sont souvent très imprécises. Dans ce cas, il faut privilégier une seconde approche et utiliser les modèles de programmation linéaire (Shunway, 1973 ; Michalland, 1995 ; Montginoul et Rieu, 1996), quadratique (Howitt *et al.*, 1980) ou mathématique multi-périodes (Varela-Ortega *et al.*, 1998) à la place des modèles économétriques.

Ces modèles de programmation partent d'une formalisation mathématique du comportement de l'agriculteur, ce dernier étant supposé maximiser son profit final. Pour un prix unitaire donné de l'eau, on calcule l'apport au champ optimal pour l'exploitant. Il suffit alors de reproduire ce calcul à différents niveaux de prix pour obtenir la fonction de demande en eau d'irrigation.

La faiblesse des modèles étudiés dans les articles précités vient généralement de la formalisation du programme du producteur et des hypothèses simplificatrices, comme la neutralité envers le risque (Varela-Ortega *et al.*, 1998) ou bien le choix d'une forme fonctionnelle pour fonction de production.

Dans cet article, nous déterminerons la demande en eau d'irrigation grâce à un modèle de programmation. Une difficulté de ce travail est de spécifier la fonction de production. Contrairement à l'ensemble des travaux cités précédemment, nous ne considérons pas une fonction de réponse à l'eau *ad hoc*. En effet, pour se rapprocher de la réalité, nous avons utilisé un modèle de simulation agronomique, EPIC-Phase, ce qui, à notre connaissance, est original¹. Toujours dans un souci de réalisme, nous avons intégré l'aspect dynamique de la décision, l'incertitude cli-

1. Cette approche par couplage a toutefois déjà été utilisée pour des problèmes agricoles (pour une synthèse voir Flichman, 1997 ou Flichman et Jacquet, 2002, <http://ressources.iamm.fr/publi/jacquet3.pdf>).

matique et l'aversion pour le risque de l'exploitant. Le programme de décision de l'agriculteur pour une campagne d'irrigation est un programme dynamique. En effet, l'un des problèmes de l'agriculteur est d'optimiser la répartition des apports en fréquence et en quantité. Cette réalité nous a conduit à utiliser un programme d'optimisation calendaire numérique. De par l'aspect aléatoire du climat, ce programme d'optimisation doit, de plus, intégrer que les choix de l'agriculteur sont pris dans un cadre incertain. Enfin, l'agriculteur étant averse au risque, son objectif est de maximiser l'utilité de son profit. Conformément à la littérature, (Chavas et Holt, 1996), nous avons supposé que l'exploitant a une aversion relative pour le risque constante. Nous avons donc spécifié une fonction d'utilité à aversion relative envers le risque constante (CRRA).

Ce modèle nous permet d'estimer la fonction de demande en eau d'irrigation, sur une saison, pour une culture (maïs), et pour trois *scenarii* climatiques différents. Sur cette application nous montrons que, contrairement aux résultats existants, la demande en eau d'irrigation n'est pas convexe, ce qui devrait avoir des implications en terme de politique de l'eau.

Dans la première section, nous présentons le modèle. Les résultats de nos estimations sont détaillés et commentés dans la seconde section. Nous donnons les implications de nos résultats sur la politique de l'eau dans la conclusion.

Le modèle

La méthode utilisée pour évaluer la fonction de demande repose sur l'évaluation de la valeur de l'eau pour l'exploitant. Ce dernier utilise l'eau d'irrigation tant que le bénéfice retiré de l'usage d'une unité supplémentaire d'eau couvre le coût de celle-ci. En contexte de rareté, la valeur de l'eau pour l'exploitant est définie comme « *la somme maximale que l'exploitant est prêt à payer pour utiliser une unité supplémentaire de la ressource* ». Pour une quantité totale d'eau, Q , disponible pour la saison, cette valeur est la dérivée de la

fonction objectif maximisée, évaluée pour Q .

Le problème de décision séquentiel sous incertitude de l'agriculteur est le suivant :

À la date $t = 1$, l'exploitant connaît les valeurs de trois variables d'état à savoir, la biomasse $M_1 = \bar{M}$, la quantité d'eau dans le sol (réserve utile), $V_1 = \bar{V}$, et la quantité d'eau disponible pour la saison $Q_1 = Q$. Il doit allouer cette quantité d'eau efficacement en décidant à chaque période $t = 1, \dots, T-1$, de la quantité d'eau d'irrigation apportée, notée q_t .

L'exploitant averse au risque est représenté par une fonction d'utilité, notée $U(\cdot)$, choisie ici de type CRRA :

$$U(\pi) = \frac{\pi^{1-\beta}}{1-\beta}$$

β étant le coefficient d'aversion pour le risque. À chaque période, il incorpore l'information climatique réalisée et révise ses anticipations sur le climat futur en utilisant une règle bayésienne fondée sur les observations passées.

Nous avons donc un programme dynamique de maximisation sous contraintes, en univers incertain, comprenant trois variables d'état (M_t , V_t , Q_t) pour $t = 1, \dots, T-1$ et ayant pour variable de contrôle (q_t) $_{t=1, \dots, T-1}$, défini comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Max}_{q_1} E_{\Omega} \text{Max}_{q_2} E_{\Omega/q_1} \dots \text{Max}_{q_{T-1}} E_{\Omega/q_{T-2}} E_{\Omega/q_{T-1}} \\ \left[U(rY(M_T)) - C_F - \sum_{t=1}^{T-1} (cq_t + \delta_t C_F) \right] \quad (1) \end{aligned}$$

sous la dynamique des variables d'état

$$\begin{cases} M_{t+1} - M_t = f_t(M_t, V_t, \omega_t) \\ V_{t+1} - V_t = g_t(M_t, V_t, q_t, \omega_t) \\ Q_{t+1} - Q_t = -q_t \end{cases} \quad (2)$$

et sous les contraintes techniques supplémentaires

$$\begin{cases} \delta_t = \begin{cases} 0 & \text{si } q_t = 0 \\ 1 & \text{si } q_t > 0 \end{cases} \\ \underline{q} \leq q_t \leq \bar{q} \quad \text{ssi } q_t > 0 \\ M_t \geq 0, \quad V_t \geq 0, \quad Q_t \geq 0 \\ M_1 = \bar{M}, \quad V_1 = \bar{V}, \quad Q_1 = Q \end{cases} \quad (3)$$

où E_Q représente l'espérance sur le climat *a priori* tandis que E_{Q/I_t} est l'espérance conditionnelle sur le climat révisée *a posteriori* par l'apport de l'information I_t sur la période t . ω_t est un vecteur de variables climatiques, comme la pluie, le vent ou la radiation solaire, réellement réalisées au cours de la période t .

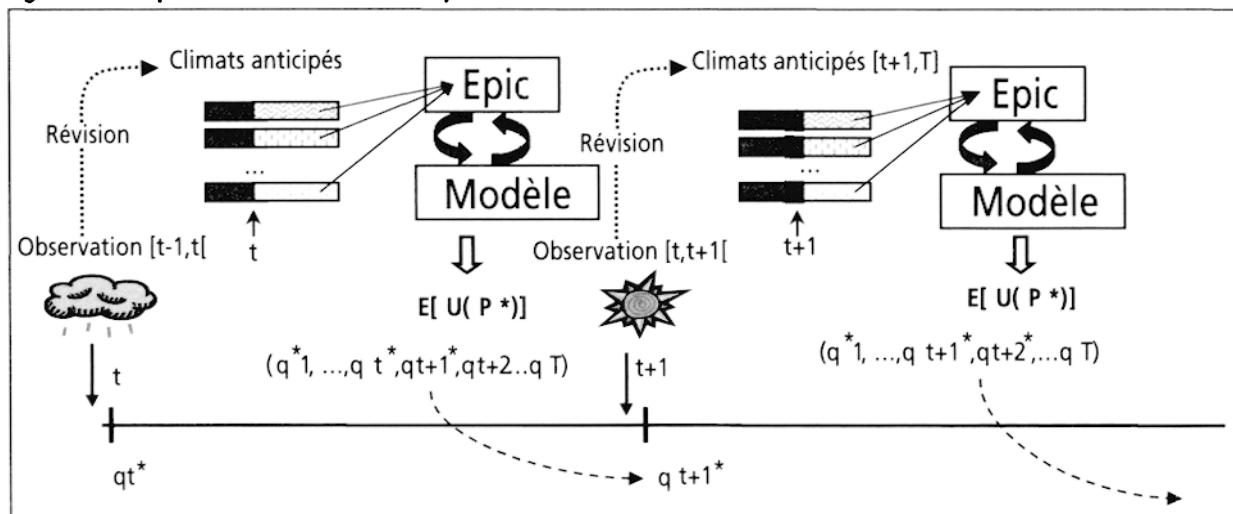
Le profit par hectare de l'exploitant est le produit du prix de vente, r , par le rendement final, $Y(M_t)$, moins les coûts fixes C_{FT} (semences, matériel), les coûts proportionnellement liés à la consommation d'eau, c , et les coûts fixes pour chaque irrigation effective, C_F .

Dans les équations (2), la dynamique de la biomasse est régie par une fonction inconnue de la valeur actuelle de la biomasse M_t , de celle de la réserve utile V_t , et des conditions climatiques durant la période ω_t , tandis que la dynamique de la réserve utile dépend également de la décision q_t prise durant la période. La quantité totale disponible pour la saison Q_t , a une dynamique décroissante simple.

Les contraintes (3) prennent en compte le fait que l'exploitant peut ne pas irriguer sur une ou plusieurs périodes, et elles définissent un minimum et un maximum d'eau apportée par irrigation.

Le programme ainsi décrit est difficile à résoudre analytiquement et son traitement sera réalisé à l'aide d'une procédure numérique. La procédure de résolution numérique (Bontemps et Couture, 2001 et 2002) reprend la méthode générale schématisée par la figure 1. Cette procédure incorpore un modèle agronomique, un modèle de calcul économique et un algorithme de recherche du maximum. L'estimation de la demande en eau d'irrigation, sera réalisée non paramétriquement sur la base des points issus de la procédure numérique (voir encadré). L'estimateur à noyau utilisé est de type gaussien, la fenêtre utilisée a été choisie sur la base de la règle empirique « du pouce » (Silverman, 1986). On estimera tout d'abord la fonction objectif optimisée $U^*(.)$, puis sa dérivée $\frac{\partial U^*}{\partial Q}(Q)$, c'est-à-dire la fonction de demande en eau.

Figure 1. Principe de la résolution numérique



Encadré. Procédure d'estimation de la demande

La procédure complète comprend la résolution du problème de décision séquentiel sous incertitude de l'agriculteur, suivie d'une procédure d'estimation de la demande, et se déroule donc en deux phases :

- Dans la première, une procédure de résolution numérique est utilisée pour résoudre le programme de maximisation défini par les équations (1), (2) et (3), pour différentes valeurs de Q . Elle incorpore le modèle de simulation agronomique EPIC-Phase, (Cabelguenne *et al.*, 1999) utilisé pour simuler les variables d'état et leurs transitions (représentées par f_t et g). Pour un climat et des prix d'inputs et d'output donnés, le modèle économique utilise les simulations du modèle agronomique pour déterminer la conduite d'irrigation optimale solution de l'équation (1) pour chaque quantité totale d'eau donnée Q_i . Un module incorpore au fur et à mesure les événements climatiques réels et anticipés, ainsi que les révisions bayésiennes de l'exploitant. L'optimisation se base sur une simulation exhaustive de l'ensemble des conduites d'irrigation, et est donc purement numérique. On obtient ainsi, par itérations sur Q_i , des couples (Q_i, U_i^*) , liant la quantité d'eau à l'utilité associée notée U_i^* . Cette étape est schématisée par le graphique 1.

- Dans la seconde phase, une procédure non paramétrique est appliquée pour estimer la fonction objectif maximisée et sa dérivée, à partir des points obtenus lors de la première phase. L'intérêt de l'estimation non paramétrique est ici fondamental puisqu'il permet de ne pas spécifier de forme prédéfinie particulière pour les fonctions, en particulier pour la demande.

À partir des couples simulés $(Q_i, U_i^*)_{i=1, \dots, n}$ la fonction objectif $U^*(.)$ associée à une quantité d'eau donnée peut être estimée non paramétriquement, en utilisant, par exemple, l'estimateur du noyau, défini comme une somme pondérée des observations U_i :

$$\hat{U}^*(Q) = \frac{\sum_{i=1}^n U_i^* K\left(\frac{Q_i - Q}{h}\right)}{\sum_{i=1}^n K\left(\frac{Q_i - Q}{h}\right)} \quad \forall Q \in R \quad (4)$$

avec $K(.)$ fonction continûment différentiable (noyau), et h paramètre de lissage (fenêtre).

La fonction de demande étant la dérivée de la fonction inconnue $U^*(.)$, un estimateur naturel de celle-ci sera la dérivée de l'estimateur $\hat{U}^*(.)$ (Härdle, 1990).

En d'autres termes, l'estimateur de la dérivée est la dérivée de l'estimateur, ou :

$$\frac{\partial \hat{U}^*}{\partial Q}(Q) = \frac{\partial}{\partial Q} \left(\frac{\sum_{i=1}^n U_i^* K\left(\frac{Q_i - Q}{h}\right)}{\sum_{i=1}^n K\left(\frac{Q_i - Q}{h}\right)} \right) \quad \forall Q \in R \quad (5)$$

C'est donc cet estimateur qui sera utilisé pour estimer la fonction de demande pour les trois *scénarios* climatiques proposés.

Application au sud-ouest de la France

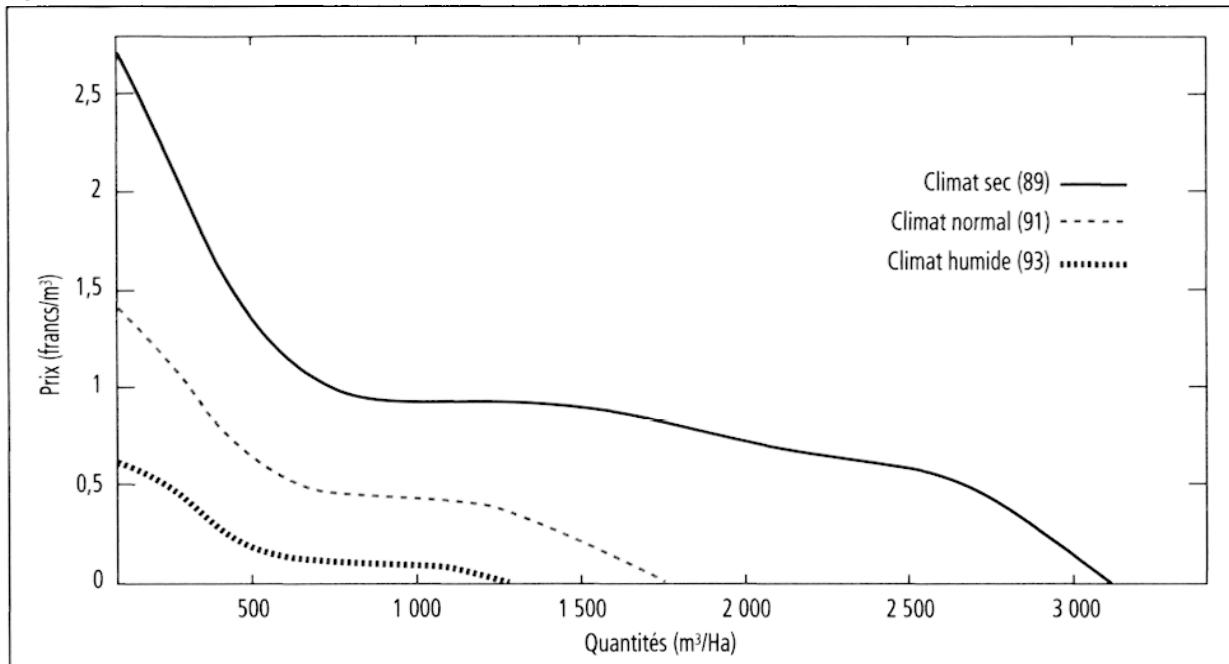
Nous avons appliqué cette méthode pour estimer les fonctions de demande en eau d'irrigation avec des données climatiques et pédo-logiques du sud-ouest de la France². Dans cette région, l'agriculture représente les deux tiers des consommations d'eau sur l'année. Cette région est caractérisée comme une zone où les conflits autour de la ressource en eau sont importants. L'irrigation, essentiellement par aspersion, concerne surtout les grandes cultures céréalières. Dans ce cadre, il nous a

semblé opportun d'estimer la fonction de demande en eau d'irrigation pour le maïs.

Les besoins d'irrigation variant en fonction des conditions climatiques, trois *scénarios* représentatifs de l'historique climatique sont retenus : un dit « normal » correspondant à l'année climatique 1991, un dit « humide » (1993) et un dit « sec » (1989). Ces deux dernières situations représentent les bornes inférieure et supérieure de la distribution de l'aléa climatique. Pour chaque scénario, nous avons fait varier les quantités d'eau disponibles de 0 à 3 500 m³ (19 points au total), conformément aux pratiques observées (Enquête Agreste, 1996).

2. Ces données sont précisées en annexe A.

Figure 2. Estimation des fonctions de demande pour les trois scénarios climatiques



Fort logiquement, on observe sur la figure 2 que la disposition à payer est d'autant plus élevée que le climat est sec. Plus surprenant, les courbes estimées³ présentent des non-convexités qui se retrouvent quel que soit le scénario climatique, ces courbes peuvent être schématiquement décomposées en trois zones. Rappelons que l'eau est à la fois un facteur essentiel à la production mais aussi, puisque l'agriculteur est averse au risque et qu'il est placé en univers incertain, un facteur qui permet de s'assurer contre le risque. En gardant à l'esprit cette dernière remarque, nous allons essayer d'expliquer cette forme spécifique de la fonction de demande.

Pour de faibles quantités d'eau d'irrigation, première zone, la courbe est fortement décroissante. Dans cette zone, l'eau est un facteur essentiel à la production, il n'est donc pas étonnant que la demande soit inélastique⁴. Bien évidemment, cette inélasticité est d'autant plus forte que le climat est

sec. L'essentialité du facteur eau prend ici le pas sur l'aspect couverture de risque.

Sur la deuxième zone, la demande présente un « plateau », ce qui signifie qu'elle est fortement réactive à une variation marginale de prix. On peut penser que cette caractéristique est due à la spécificité de la technologie de production. En effet, sur cette zone, la productivité marginale du facteur eau est constante. Étant donnée la forme de la fonction d'utilité (CRRA), un simple calcul montre que lorsque le profit marginal est constant, l'utilité marginale est constante. L'aversion pour le risque de l'agriculteur n'est donc en rien responsable de cette forme. En d'autres termes, on aurait obtenu un plateau sur la courbe de demande en eau en univers certain, en revanche, il ne se situerait pas aux mêmes niveaux, tant en prix qu'en quantité. On observe également que la deuxième zone est plus étendue pour des climats secs. Pour aller au plus simple, la production de maïs, sur cette zone particulièrement, nécessite deux facteurs, l'énergie solaire et l'eau. Or plus le climat est sec, plus le rayonnement solaire est fort et donc plus le plateau est important.

Pour des quantités plus importantes d'apport en eau, troisième zone, la demande

3. Voir également l'annexe B, pour le détail entre points simulés et estimation.

4. C'est-à-dire que la demande en eau ne décroît pas proportionnellement avec l'augmentation du prix de l'eau.

redevient inélastique mais moins fortement que sur la première zone. Ceci est surprenant, en effet, on serait plutôt porté à penser que pour des grandes quantités d'eau, la demande est élastique au prix. Pour de tels niveaux d'irrigation, il n'est pas crédible d'invoquer l'essentialité du facteur eau pour expliquer la forme de la fonction de demande. Le profit marginal est d'ailleurs très faible sur cette zone. C'est ici que l'on se rend compte de l'importance de la dimension risque dans notre modèle. En fait, sur cette zone, l'agriculteur averse au risque cherche à s'assurer contre les variations de profit. Même si le profit marginal est faible, étant donnée la forme de la fonction d'utilité, les impacts d'une variation marginale du profit sont relativement importants en terme de fonction d'objectif. C'est pour cette raison que la demande redevient relativement inélastique dans cette zone.

Conclusion

Au prix d'une certaine complexité méthodologique, nous avons obtenu un résultat qui contredit la littérature. Il semblerait que la demande en eau d'irrigation ne soit pas convexe. La principale caractéristique de cette fonction est qu'elle présente un « plateau » quel que soit le scénario climatique. Plaçons-nous dans le cas où la régulation est primordiale, c'est-à-dire pour une année sèche. Partons d'une politique de prix qui serait de 0,85 F/m³ et supposons que le

régulateur s'aperçoive que les agriculteurs consomment « trop » d'eau, en regard de l'optimum social, et ceci malgré cette politique de prix⁵. Fort logiquement, il va décider d'augmenter le prix du m³ d'eau. Imaginons que le régulateur augmente ce prix de 10 %. La consommation d'eau d'irrigation va ainsi passer de 1 700 à 800 m³/ha et donc diminuer de plus de 50 %. Clairement une augmentation marginale du prix au m³ a des conséquences qui ne sont pas marginales en terme de consommation. Le régulateur voulait diminuer la consommation d'eau de l'agriculteur, ce but, certes atteint, a pour conséquence une forte baisse de la production agricole.

Cette conséquence n'était sans doute pas dans l'agenda du régulateur. Supposer que la demande en eau d'irrigation est convexe – et que donc pour des valeurs moyennes, des variations marginales de prix conduisent à des variations marginales de la production agricole – peut conduire à ce genre de mésaventure. ■

Nous remercions Alain Bousquet, Philippe Bontems, Robert Chambers, Alain Ayong le Kama, Nina Kousnetzoff et les participants au L^e congrès de l'Association française de science économique (AFSE), ainsi que Céline Nauges pour ses encouragements.

5. Notons que le prix actuel de l'eau dans le Sud-Ouest est de 0,25 F/m³.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Agreste. *Les pratiques culturelles sur grandes cultures en 1994*. Enquête Agriculture, ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation, 1996, 85 (08).
- Belhaj-Hassine N., Thomas A. *Aversion au risque et décisions de production : l'agriculture irriguée en Tunisie*. SFER, Économie rurale, 2001, n° 266, p. 91-108.
- Bontemps C., Couture S. *Dynamique et incertitude dans la gestion de l'irrigation*. INRA, Cahiers d'économie et socio-logie rurales, 2001, n° 55-56, p. 25-43.
- Bontemps C., Couture S. *Irrigation Water Demand for the Decision Maker*. Environment and Development Economics, 2002, vol. 7 (4), p. 643-657.
- Cabelguenne M., Debaeke P., Bouniols A. *EPIC-Phase, a Version of the EPIC Model Simulating the Effects of Water and Nitrogen Stress on Biomass and Yield, Taking into Account of Developmental Stages: validation on maize, sunflower, sorghum, soybean and winter wheat*. Agricultural Systems, 1999, 60, p. 175-196.
- Chavas J.-P., Holt M.-T. *Economic Behavior Under Uncertainty: a joint analysis of risk preferences and technology*. Review of Economics and Statistics, 1996, 78, p. 329-335.
- Coman K. *Some Unsettled Problems of Irrigation*. American Economic review, 1911, I (1), p. 1-19.
- Couture S. *Aspects dynamiques et aléatoires de la demande en eau d'irrigation*. Thèse de doctorat, Université de Toulouse I, 2000.
- Flichman G. *Bio-economic Models Integrating Agronomic, Environmental and Economic Issues with Agricultural Use of Water*. CIHEAM- Options Méditerranéennes, 1997, Série A/N° 31.
- Härdle W. *Applied Nonparametric Regression*. Econometric society monographs. Cambridge University Press, 1990.
- Howitt R.E., Watson W.D., Adams R.M. *A Reevaluation of Price Elasticities for Irrigation Water*. Water Resources Research, 1980, 16, p. 623-628.
- Michalland B. *Approche économique de la gestion de la ressource en eau pour l'usage de l'irrigation*. Thèse de doctorat, Université de Bordeaux, 1995.
- Montginoul M., Rieu T. *Instruments économiques et gestion de l'eau d'irrigation en France*. La Houille Blanche, 1996, 8, p. 47-54.
- Moore M. R., Gollehon N. R., Carrey M.B. *Multicrop Production Decisions in Western Irrigated Agriculture: the role of water price*. American Journal of Agricultural Economics, 1994, p. 359-374.
- Ogg C.W., Gollehon N.R. *Western Irrigation Response to Pumping Costs: a water demand analysis using climatic regions*. Water Resource research, 1989, 25, p. 767-773.
- Silverman B.W. *Density Estimation for Statistics and Data Analysis*. In volume. 26 of Monographs on statistics and applied probability, Chapman and Hall, London, 1986.
- Shunway C.R. *Derived Demand for Irrigation Water: The California Aqueduct*. Southwestern Journal of Agricultural Economics, 1973, 5, p. 195-200.
- Varela-Ortega C., Sumpsi J.-M., Garrido A., Blanco M., Iglesias E. *Water Pricing Policies, Public Decision Making and Farmers' response: implications for water policy*. Agricultural Economics, 1998, 19, p. 193-202.

ANNEXES

Annexe A. Données utilisées

Un premier jeu de données est nécessaire pour un paramétrage correct du modèle de croissance EPIC-Phase. Ces données incluent des données climatiques pour les années considérées, ainsi que des informations relatives au sol, à la culture, à la parcelle, aux itinéraires techniques, au matériel utilisé et à la fertilisation. Les données climatiques sont issues de relevés de la station de l'INRA sur la période 1983-1996. Les paramètres techniques ont été validés par les agronomes de la station d'agronomie de l'INRA Toulouse (Cabelguenne *et al.*, 1999) et ne seront pas reportés en détail ici.

Un second jeu de données concerne le prix des inputs et les prix de vente du maïs et sont donnés dans le tableau. Les prix des inputs incluent les coûts variables d'irrigation (prix de l'eau) et les coûts fixes par irrigation, (C_F), incluant l'énergie et le travail. Les coûts fixes, (C_{FT}), comprennent les fertilisants, les semences, et l'assurance grêle.

Tableau 1. Prix des inputs et de l'output

Année	Prix du maïs r (Francs/tonne)	Prix de l'eau c (Francs/m ³)	Coûts par irrigation C_F (Francs)	Coûts fixes C_{FT} (Francs)
1989	1 049	0,25	150	2 150
1991	1 038	0,25	150	2 150
1993	778	0,25	150	2 150

Sources : ITCF (1998), *Données prix céréales, document de travail*. Michalland (1995) ; Couture (2000).

Annexe B. Fonction U^* simulée et estimée en 1989