

Une Méthode d'Evaluation de la Fonction de Demande en Eau d'Irrigation.

A method For Evaluating Irrigation Water Demand.

Christophe BONTEMPS*and Stéphane COUTURE†

Juillet 1999

Résumé court

L'objectif de cet article est de proposer une méthode permettant de calculer la fonction de demande en eau pour l'irrigation. Notre approche s'effectue en deux étapes successives. Premièrement, une base de données est générée par un modèle de programmation mathématique dynamique économique intégrant un modèle de simulation agronomique. Deuxièmement, la fonction de demande est estimée, à partir de ces points, par la méthode non paramétrique du noyau de convolution.

Short abstract

In this paper we focus our attention to define an original method of estimating water irrigation demand. The approach used in this analysis can be divided into two stages. First, we compute an economic dynamic programming model which incorporates an agronomic crop growth model, in order to obtain database. Second, data are used to estimate irrigation water demand functions by the kernel nonparametric method.

*INRA and LEERNA, Université de Toulouse I, 21 allée de Brienne, 31000 Toulouse, France. Tél : 05.61.12.85.24
Fax : 05.61.12.85.20 Email : bontemps@toulouse.inra.fr.

†LEERNA and GREMAQ-UTI, Université de Toulouse I, 21 allée de Brienne, 31000 Toulouse, France. Tél :
05.61.12.85.12 Fax : 05.61.12.85.20 Email : scouture@toulouse.inra.fr.

Résumé long

L'eau, ressource abondante mais très inégalement répartie, est de plus en plus source de conflits entre les trois principaux utilisateurs : ménages, industriels et agriculteurs. L'agriculture est souvent présentée comme le principal responsable ainsi que la première source de consommation. Cependant, les niveaux de prélèvements en eau d'irrigation sont assez mal connus. Or, cette information s'avère indispensable pour assurer une gestion efficace de la ressource. L'objectif de cet article est d'évaluer la fonction de demande en eau pour l'irrigation. Nous présentons une méthode originale d'évaluation qui s'effectue en deux temps. Premièrement, nous avons conçu un programme mathématique dynamique afin d'optimiser la conduite de l'irrigation. Basé sur une approche micro-économique descriptive du comportement de l'exploitant agricole, ce modèle économique, intégrant un modèle de production agronomique, est utilisé pour générer une base de données. Deuxièmement, cet ensemble est utilisé pour estimer les fonctions de production, de profit et de demande en eau agricole par la procédure d'estimation non paramétrique du noyau de convolution. L'ensemble des données utilisées portent sur la région du Sud-Ouest de la France, région où des conflits d'usage apparaissent fréquemment en période estivale ou de sécheresse. La fonction de demande est fortement dépendante du climat retenu mais présente une tendance générale. D'abord inélastique, la demande en eau devient élastique à partir d'un prix de la ressource seuil variant de 0,27 à 1,57 F/m^3 selon le scénario climatique.

Long abstract

Water is an abundant but unevenly allocated resource in France. Conflicts between different categories of users are likely to appear during low river flow periods. In these situations, as water becomes a scarce resource, irrigation water use is by far the largest water consumer in France. Irrigation water consumption is not observable and unknown. The starting point to carry out an efficient management of water is the knowledge of these informations. This paper's objective is to estimate water irrigation demand. We develop an original method of estimating in two steps. First, we develop a dynamic programming model in order to explain the optimal irrigation management plan. Based on a microeconomic approach describing the behavior of the farmer, this economic model, introducing the agronomic model EPIC, is used to obtain database. Second, these data are used to estimate yield, profit, and irrigation water demand functions by the kernel nonparametric method. The data base used to estimate irrigation water demand has been collected in the southwestern area of France where conflicts appear frequently. Results show that irrigation water demands are strongly dependent on weather conditions. At low prices irrigation water demand is inelastic and at higher prices demand becomes more elastic. The threshold price at which the water demand becomes more elastic depends on climate and fluctuates between 0,27 and 1,57 F/m^3 .

Mots clés : demande en eau d'irrigation, programmation, estimation non paramétrique.

key words : irrigation water demand, programming model, nonparametric method.

JEL classification : C14, C16, Q15

1 Introduction

L'eau est une ressource globalement abondante mais très inégalement répartie. En France, durant la période d'été¹, les ressources en eau n'évoluent pas au même rythme que les besoins, d'où l'apparition de conflits d'usages entre les trois principaux utilisateurs du bien : les ménages, les industriels et les agriculteurs. Ces derniers sont devenus la principale source de consommation en France². Actuellement, l'agriculture peut représenter 80% des consommations nettes totales d'eau en France pendant la période d'été.

L'irrigation qui permet à l'agriculteur de se prémunir contre les risques climatiques, a connu un formidable développement au cours de ces dernières années. Cet essor a été favorisé par un contexte économique de production intensive et d'aides en faveur de l'hydraulique agricole, provoquant une forte augmentation des prélèvements en eau.

C'est surtout en période estivale ou de sécheresse, lorsque les ressources sont au plus bas, que les risques de conflits sont les plus courants. Cependant, la consommation en eau d'irrigation est assez mal connue. Une meilleure connaissance des prélèvements et des consommations en eau pour l'irrigation apparaît importante pour assurer la maîtrise des consommations, réduire les conflits d'usages et améliorer la gestion des ressources en eau. Face au problème de rareté de la ressource, un des instruments de politique les plus utilisés et analysés dans la littérature est l'établissement de systèmes de prix de l'eau différents afin de dégager les sentiers de réponse de son usage en agriculture. Proposer un mode de gestion des conflits et plus globalement de la ressource en eau prenant en compte que l'eau est devenue un bien rare suppose la détermination de la demande en eau agricole.

L'eau utilisée pour l'irrigation, en tant que bien économique, présente plusieurs caractéristiques. D'une part, l'eau vue comme un facteur de production, est inobservable dans le sens où l'agriculteur est le seul à connaître exactement quelle quantité de ressource il utilise et où il n'existe pas d'organisme susceptible de vérifier ces informations³. D'autre part, le prix de ce bien est nul. La propriété de l'eau en France est du domaine public. Les droits d'allocation de la ressource sont assignés aux irrigants par autorisations de prélèvements de l'eau rigides non échangeables. Les agriculteurs ne supportent pas véritablement de charge relative à leur consommation en eau. Ils payent des redevances qui correspondent exclusivement aux coûts de construction et de maintenance des capacités de délivrance et de stockage de la ressource. Il n'existe pas de marché pour réguler l'acquisition de la ressource.

Le débat en France porte sur les possibilités d'épargne de la ressource susceptibles d'être réalisées par l'imposition de prix reflétant la valeur de l'eau à son coût d'opportunité. Les exploitants agricoles étant libres d'utiliser ce facteur, les Pouvoirs Publics souhaitent se doter de moyens incitatifs pour pousser les agents à utiliser plus efficacement la ressource. De plus, la loi sur l'eau du

¹Dans le Sud-Ouest de la France, cette période, définie de juin à septembre, se caractérise par un niveau de débit des rivières très faible.

²Les consommations nettes se répartissaient, en 1990, en 2,5 Md m^3 pour la consommation domestique, 0,8 Md m^3 pour la consommation industrielle et 2,7 Md m^3 pour la consommation agricole (soit 45% des consommations) (Ministère de l'Environnement).

³Hormis quelques exceptions notamment dans certaines exploitations agricoles de la Charente, aucun organisme ne peut véritablement constater les mouvements de compteurs des consommations au champ, comme pour la demande domestique. Les seules données disponibles sur les consommations d'eau sont les déclarations faites par les exploitants agricoles pour le règlement de la redevance de prélèvement des agences de l'eau, le versement des primes à l'hectare irrigué ou pour des enquêtes de pratiques culturales (Enquête Agreste sur les pratiques culturales de 1994).

3 janvier 1992 envisage la valorisation de l'eau en tant que bien économique pour tous les usagers. Ainsi, dans un contexte de rareté de la ressource, analyser et comprendre les effets de systèmes de prix sur l'épargne de l'eau est une contribution décisive à l'analyse de politique (Moore et al., 1994). Il faut avant tout pour cela connaître la demande en eau des producteurs agricoles pour ensuite comprendre la façon dont serait affecté leur comportement face à des modifications de prix. La demande sera-t-elle élastique au prix, jusqu'à quel seuil ? Telles sont les questions auxquelles nous tenterons de répondre dans cet article.

La fonction de demande en eau relie le coût de la ressource perçu par l'exploitant agricole avec la quantité de bien consommée. Nous nous intéressons exclusivement ici à la fonction de demande en eau à court terme⁴ c'est-à-dire dans le cas où le processus de décision de l'irrigant est uniquement la conduite de l'irrigation au cours de la campagne. A court terme, lorsque les cultures ont déjà été mises en place et que l'équipement ne peut être modifié, les décisions de l'agriculteur se réduisent au choix de la conduite d'irrigation de la culture. L'unique variable de contrôle est la quantité d'eau apportée, les autres variables étant supposées fixes.

Dans le cas de l'irrigation, la connaissance de la fonction de réponse à l'eau des plantes permet de calculer aisément la conduite optimale pour un équipement donné (voir Bontemps et Couture, 1999).

Revue des études existantes :

Il existe, dans la littérature, deux types d'approches pour évaluer la fonction de demande en eau d'irrigation : l'approche descriptive par modélisation du comportement de l'agriculteur et l'approche économétrique par analyse ex post du comportement des agents économiques.

Anderson (1983) a été le premier à analyser la demande d'irrigation tant par une approche économétrique que par des modèles de programmation. Il conclut à une inélasticité de la demande à des prix faibles et une demande élastique pour des prix élevés. Ce résultat sera confirmé par l'ensemble des études réalisées.

Dans le cas économétrique, l'analyse repose sur l'observation des consommations en eau et consiste à établir une relation entre ces données et le coût perçu de la ressource. Cette technique a été très peu utilisée en France (Michalland, 1997)⁵ du fait du peu de disponibilité des données relatives aux consommations en eau. Cependant depuis quelques années, les modèles économétriques connaissent une application extensive à l'analyse empirique des effets de la tarification de l'eau d'irrigation sur la demande agricole et sur les décisions de production (Chambers et Just, 1989 ; Just et al., 1990 ; Moore et al., 1992 et 1994 ; Hassine et Thomas, 1997). La plupart de ces études adoptent une représentation paramétrique des fonctions duales du fait de l'absence d'une expression explicite de la fonction de production. Elles utilisent alors une spécification de la demande d'input de type dual et sont réalisées avec des données d'échantillons.

Les auteurs utilisent un modèle de firmes multi-produits permettant d'analyser la réponse des agriculteurs face à une variation du prix de l'eau tant à moyen terme (c'est-à-dire au niveau du choix de l'assolement et des décisions d'allocation des surfaces) qu'à court terme (sur les décisions d'utilisation de la ressource) (Moore et al., 1992 et 1994). La fonction de demande au niveau de

⁴La définition de court terme est celle habituellement utilisée dans les recherches précédentes sur l'agriculture irriguée (Chambers et Just, 1989 ; Just et al., 1983, 1990 ; Moore et al., 1994).

⁵Aux Etats Unis, on rencontre quelques applications de cette méthode : Ogg et Gollehon (1989), Connor et al. (1989).

l'exploitation agricole s'écrit comme la somme des demandes d'eau au niveau de la culture. De plus, de nombreux auteurs (Caswell et al., 1990 ; Negri et Brooks, 1990 ; Nieswiadomy, 1988 ; Ogg et Collehon, 1989 ; Moore et al., 1992 et 1994) utilisent les coûts marginaux de pompage de l'eau souterraine⁶ pour mesurer le prix de la ressource. Ces auteurs établissent que des modifications de prix de la ressource n'affectent que l'allocation de la terre entre les différentes cultures mais ne modifient pas l'utilisation de la ressource à court terme.

Ces résultats sont aussi vérifiés dans Hassine et Thomas (1997) qui utilisent une approche économétrique duale appliquée aux districts de l'irrigation tunisiens. Ils montrent l'inélasticité relative de la demande d'eau d'irrigation et concluent que les mécanismes de prix ne sont pas les meilleures politiques de conservation de la ressource.

Parallèlement, de nombreux auteurs ont utilisé des modèles de programmation pour analyser les réponses des demandes en eau agricoles aux prix de la ressource. L'approche descriptive établit une fonction de demande considérée comme la succession de décisions que l'on modélise par des techniques de programmation mathématique : linéaire (Montginoul et Rieu, 1996) ou dynamique (Schaible, 1997 ; Garrido et al., 1997, Varela-Ortega et al., 1998 ; Iglesias et al., 1998). La plupart de ces études utilisent des typologies d'exploitations agricoles afin d'analyser l'impact de la tarification de la ressource sur la demande en eau, appliquées au bassin de la Charente en France (Montginoul et Rieu, 1996) ou à différents districts en Espagne (Garrido et al., 1997, Varela-Ortega et al., 1998 ; Iglesias et al., 1998). Un résultat commun à ces études est que la demande en eau est inélastique au dessous d'un prix seuil donné (Montginoul et Rieu⁷, 1996 ; Schaible⁸, 1997 ; Garrido et al., 1997, Varela-Ortega et al.⁹, 1998 ; Iglesias et al., 1998). Pour des prix faibles, la demande en eau est inélastique tandis que pour des prix élevés, la demande devient plus élastique. Le prix seuil est fonction des districts (Garrido et al., 1997, Varela-Ortega et al., 1998 ; Iglesias et al.¹⁰, 1998). La politique de prix de la ressource doit donc être spécifique à la région étudiée.

L'objectif de cet article est d'évaluer la fonction de demande en eau pour l'irrigation par une approche descriptive avec modélisation du comportement de l'exploitant agricole. La fonction de demande est, dans ce cas, considérée comme le résultat d'une succession de décisions en matière de choix d'irrigation que l'on modélise à l'aide d'un modèle de production.

⁶L'eau souterraine est vue par l'agriculteur comme une source marginale d'eau.

⁷Ils montrent d'une part, que la demande en eau est sensible au prix et n'est pas linéaire, et d'autre part, que l'élasticité de la demande devient forte au voisinage du prix seuil de $1,51 F/m^3$ et qu'au delà d'un prix de $1,55 F/m^3$, la demande est pratiquement inexistante.

⁸Selon cet auteur, la demande d'eau agricole est beaucoup plus élastique au prix si l'accès à la ressource souterraine n'est pas limité, conformément au principe Le Chatelier, et qu'une politique de prix de l'eau dans ce contexte ne sera pas efficace si elle a pour objectif la conservation de la ressource. Quand l'eau souterraine est limitée, l'effet prix ne sera pas nécessairement négatif. Les producteurs perdant l'option de minimiser les pertes économiques subies par la hausse du coût de la ressource via la substitution de la source d'eau, ils supportent alors le coût d'une augmentation du prix de l'eau ce qui leur procure des niveaux de revenus plus faibles.

⁹Il apparaît des différences marquées entre les demandes en eau pour les trois districts de rivières étudiés en Espagne. Pour les deux bassins (Castille et Valence), la demande est inélastique pour des prix faibles jusqu'à un seuil variant de $17 pesetas/m^3$ ($= 0,67F/m^3$) pour la Castille à $35 pesetas/m^3$ ($= 1,38F/m^3$) pour Valence. A la différence, pour le troisième district (Andalousie), la demande en eau est élastique pour des prix allant de 4 à 30 $pesetas/m^3$ ($= 0,161,18F/m^3$). Dans ce bassin, la réponse rapide de la demande en eau pour des faibles changements de prix est due à son remarquable potentiel de production, à la variété des cultures ainsi qu'aux exploitations de grande taille, en opposition avec les deux autres régions où les exploitations agricoles sont de type familial avec une capacité de production très limitée et peu de variétés de culture.

¹⁰Le prix seuil, fonction des districts, est d'environ $12 pesetas/m^3$ ($= 0,47 F/m^3$).

Le modèle peut ainsi être utilisé avec des hypothèses différentes de prix et des contraintes de quantité. Il permet d'analyser l'effet de différents niveaux de prix de la ressource sur le comportement de l'agriculteur et sur la demande en eau d'irrigation.

Nous avons retenu comme approche une méthode de type primal basée sur la fonction de production qui correspond, dans notre cas, à la fonction de réponse à l'eau de la culture, l'eau étant considérée comme le seul intrant limitant de production. Cette fonction est générée par simulations du logiciel agronomique de croissance de la culture, EPICPHASE¹¹, qui permet de simuler le rendement pour différents scénarios climatiques et différentes conduites d'irrigation. Cette base de données est ensuite utilisée pour estimer la fonction de production par une procédure d'estimation non paramétrique du noyau de convolution. Etant donnés les prix des intrants et des extrants et l'ensemble des choix de plans de production, le profit est maximisé, par un modèle dynamique économique, pour chaque quantité de ressource disponible. L'ensemble des profits simulés est alors, comme pour la fonction de production, utilisé pour estimer, par la même procédure économétrique, la fonction de profit. La dérivation de cette fonction permet d'estimer la fonction de demande en eau à usage agricole.

L'ensemble des applications numériques reposent sur des données relatives à la région du Sud-Ouest de la France. Les résultats des procédures d'estimation des fonctions de demande montrent que ces dernières sont dépendantes du climat considéré. On retrouve, de plus, un résultat couramment rencontré dans la littérature : les fonctions de demande sont inélastiques pour des prix faibles puis au-dessus d'un prix seuil, elles deviennent élastiques. Ces prix seuils dépendent du scénario climatique et fluctuent entre $0,27 F/m^3$ pour une année humide à $1,57 F/m^3$ pour une année sèche. Par conséquent, ces résultats valident notre méthode d'évaluation de la demande en eau agricole.

La connaissance des réponses des agriculteurs à des niveaux de prix de la ressource différents est un outil indispensable au gouvernement pour définir les politiques de l'eau dans le but de réduire la demande en eau et d'améliorer la protection de la ressource.

Cet article est organisé comme suit. Le modèle théorique d'évaluation de la fonction de demande en eau d'irrigation est exposé à la section 2. Des solutions numériques peuvent être déterminées par une procédure d'évaluation du modèle présentée à la section 3. Nous examinons les résultats à la section 4 et dégageons quelques conclusions à prendre en considération dans la définition de politiques de tarification de la ressource. Nous concluons brièvement à la section 5.

2 Le modèle théorique d'évaluation de la fonction de demande en eau d'irrigation

2.1 Le problème de décision séquentielle

Le problème d'allocation optimale intra-saisonnière de l'eau d'irrigation dans un environnement dynamique appartient à la classe de problèmes de contrôle optimal à temps discret et à horizon fini (T périodes) que l'on représente par l'ensemble des équations suivantes (1), (2), (3) et (4).

¹¹Nous avons utilisé le modèle agronomique EPICPHASE développé à partir du modèle initial EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator, Williams et al. (1990)) par les agronomes de la station de l'INRA Toulouse (Cabelguenne et Debaeke, 1995) en remédiant à ses carences relatives à l'impact des stress hydriques sur la croissance de la culture.

La fonction objectif est :

$$- \sum_{t=1}^{T-1} C_t(q_t) + pY(X_T) \quad (1)$$

où

- X_t est un vecteur colonne de variables d'état à 2 composants : la matière sèche, m_t , et le stock d'eau dans le sol, v_t , défini dans un espace E^2 :

$$X_t = \begin{pmatrix} m_t \\ v_t \end{pmatrix}$$

- q_t est un vecteur colonne de variable de contrôle à 1 composant : la quantité d'eau apportée par l'irrigation à la période t , défini dans un espace E^1 .
- $C_t()$ est une fonction instantanée qui représente les coûts pour chaque période jusqu'à T-1. La fonction de coût est supposée linéaire, $cq_t + CF$ où c est le coût de l'eau au m^3 et CF représente les coûts fixes.
- La fonction terminale est la fonction de revenu de la culture, $pY(X_T)$ où p est le prix exogène de la culture et $Y(.)$ est une fonction transformant la matière sèche en rendement à la récolte, T. La fonction Y est la fonction de production¹². Cette fonction sera décrite de façon plus précise dans la section 3. $Y(.)$ est supposée différentiable.

Les dynamiques des variables d'état sont :

$$X_{t+1} - X_t = f_t(X_t, q_t) \quad \text{pour } t = 1, \dots, T - 1 \quad (2)$$

X_1 est un vecteur connu exogène : $X_1 = \hat{X}$.

Cette équation représente le comportement dynamique du système indiquant que le changement de niveau de la variable d'état est une fonction de son état présent, de la décision prise et de la période. Les fonctions de transition définissant la dynamique du système sont définies par le modèle agronomique. Elles sont supposées différentiables.

Il existe des contraintes sur les variables de contrôle :

$$g_t(q_t) = Q - \sum_{i=1}^t q_i \geq 0 \quad \text{pour } t = 1, \dots, T - 1 \quad (3)$$

Le décideur fait face à une quantité totale d'eau disponible au cours de la campagne fixée, Q .

$$\underline{q} \leq q_t \leq \bar{q} \quad \text{pour } q_t > 0 \quad \text{et } t = 1, \dots, T - 1 \quad (4)$$

¹²La fonction de production générale de notre problème est de la forme :

$$Y = F(\text{inputs}; \theta)$$

où les inputs sont l'eau, l'azote et les phytosanitaires, et θ un vecteur de paramètres techniques (matériel, travail) et environnementaux (sol, climat) fixés. On considère que les inputs autres que l'eau sont optimisés. Ce problème réduit n'engendre pas de perte de généralités car par des considérations biologiques, il est possible de dégager les niveaux d'azote et de phytosanitaires optimaux telle que la plante ait une croissance maximale en conditions non limitantes pour ces deux facteurs. Par conséquent, la fonction de production se ramène à une fonction de réponse à l'eau.

La quantité apportée à chaque période ne doit correspondre à des niveaux ni trop faibles ni trop élevés. Il existe différentes explications techniques comme économiques à cette contrainte.

La formulation de notre problème est conceptuellement similaire à celles de Zavaleta et al. (1980), de Johnson et al. (1991) et de Vickner et al. (1998).

La résolution de ce programme¹³ détermine le sentier de décisions optimales :

$$\{q_t^*\}_{t=1,\dots,T-1}$$

qui est une fonction de la quantité totale disponible, Q .

Cette séquence de décisions optimales est réintégrée dans la fonction objectif pour ainsi évaluer le critère optimal :

$$\pi^* = py_T^* - \sum_{t=1}^{T-1} (cq_t^* + CF)$$

qui est lui aussi fonction de Q . On obtient ainsi une fonction de profit optimisé, $\pi^*(Q)$, fonction de la quantité d'eau totale disponible pour la campagne.

2.2 L'estimation de la fonction de demande en eau

Dans un contexte de rareté, la valeur de l'eau en tant que bien économique pour un utilisateur est le montant maximum qu'il serait prêt à payer pour utiliser ce bien. Pour des biens économiques normaux, échangés entre acheteurs et vendeurs sur un marché, cette valeur peut être mesurée en estimant la surface sous la courbe de demande (figure 1). Les marchés de l'eau n'existant pas en France, il n'est pas simple de déterminer cette valeur. Cependant, cette valeur peut être calculée par une procédure d'estimation des fonctions de production et simulation des variations de la production résultant de l'usage d'une unité supplémentaire de la ressource¹⁴.

On s'intéresse alors au coût d'opportunité d'une unité supplémentaire de la ressource¹⁵, λ , qui est, à l'optimum, la dérivée de la fonction objectif optimisée :

$$\lambda = \frac{d\pi^*(Q)}{dQ}$$

que l'on évalue pour le niveau de quota fixé.

Le coût d'opportunité d'accès à l'eau représente la disposition maximale à payer de l'agriculteur pour avoir, dans un contexte de rareté, une unité supplémentaire de ressource ; c'est le prix maximum réel par unité d'eau qu'il serait prêt à payer.

Ainsi, la connaissance de la fonction $\frac{d\pi}{dQ}$ pour tous les niveaux de quotas Q possibles permet de générer la fonction de disposition à payer maximale du producteur agricole. Cette fonction n'est rien d'autre que la fonction implicite de demande en eau agricole.

¹³La démarche de résolution d'un tel problème est expliquée de façon détaillée dans Bontemps et Couture (1999).

¹⁴Il existe également deux autres méthodes pour calculer cette valeur : l'estimation de la fonction de demande puis l'intégration de la surface sous cette courbe ou l'estimation des fonctions de coût de fourniture de l'eau en cas de non disponibilité de la ressource existante, mais la difficulté de ces deux techniques est qu'elles nécessitent un nombre très importants de données qui ne sont pas, pour la plupart, disponibles.

¹⁵Lorsque des rationnements en eau sont introduits, le coût d'accès à l'eau devient différent du profit marginal, $\frac{d\pi}{dQ}$. En effet, l'agriculteur serait certainement disposé à payer plus que le coût d'accès pour irriguer plus. Une application directe du théorème de l'enveloppe permet de montrer que pour un quota d'eau de niveau \hat{Q} , ce coût d'opportunité est juste égal à $\frac{d\pi}{dQ}$ évalué en $Q = \hat{Q}$.

La fonction de demande en eau s'écrit :

$$q = q(p)$$

où p est le prix de l'eau et q est la consommation de la ressource. Elle est représentée en figure 1.

FIG. 1: Fonction de demande en eau.

Pour analyser les implications de politiques de prix, il est courant de mesurer la façon dont les utilisateurs réagissent à des changements de prix de la ressource. Un accroissement de prix de l'eau, de p à $p + dp$, engendre une diminution de la consommation, de $q(p)$ à $q(p + dp)$. Les surfaces (A+B) sous la courbe de de demande représentent les pertes de bien-être dues à un prix de la ressource plus élevé¹⁶. Pour évaluer les impacts de politiques de tarification différentes, il est fait appel au concept d'élasticité qui est une mesure définie comme le pourcentage de changement d'utilisation de l'eau qui fait suite à une variation de 1% du prix de la ressource. L'élasticité prix de la demande d'eau est donnée par :

$$\mu = \frac{dq}{dp} * \frac{p}{q}$$

Quand l'élasticité prix de la demande est inférieure à -1, en valeur absolue, (c'est-à-dire quand le changement en pourcentage de la consommation est moins que le changement en pourcentage du prix), alors la demande est dite inélastique au prix¹⁷.

3 Domaine d'analyse, procédures de simulation et d'estimation

3.1 Domaine d'analyse

¹⁶La surface A représente les pertes de bien-être subies par l'agriculteur dues à la réduction de sa consommation tandis que la surface B décrit les pertes de revenu du gouvernement dues à la diminution de la consommation en eau.

¹⁷Si l'élasticité prix est négative, alors la demande est réduite quand les prix augmentent, mais de façon moindre que le changement de prix.

3.1.1 Le contexte

Conduite permettant de se couvrir contre les aléas climatiques, l'irrigation est une solution coûteuse qui peut être soumise à des contraintes de ressource en eau. En France, les dernières sécheresses consécutives montrent la fragilité du système actuel, surtout au niveau de l'exploitation agricole. Elles ont montré que l'eau était devenue une ressource rare et fragile, nécessitant une gestion rigoureuse. Elles ont de plus accentué les conflits d'usage. Certaines sécheresses ont engendré des mesures administratives d'interdictions ou de limitations d'irriguer avant la fin de la campagne afin de garantir l'alimentation en eau potable. L'enjeu économique d'une telle décision est important pour l'exploitant agricole : la décision administrative peut provoquer une perte de récolte conséquente. Ce type de réglementation n'est pas optimal. Il faut, par conséquent, dans une optique de gestion efficace de la ressource, connaître la demande de chaque utilisateur.

Les simulations de cet article se basent sur des données numériques se référant à la région Sud-Ouest de la France. Dans cette région délimitée par le bassin hydrographique de la Garonne, l'agriculture représente le premier poste de prélèvements d'eau et les deux tiers des consommations nettes sur l'année et même jusqu'à 85% des prélèvements en période d'étiage. Elle est souvent citée comme zone où les conflits autour de la ressource en eau sont importants. L'irrigation de cette zone est récente et caractérisée par une part importante de grandes cultures comme le maïs. Les besoins d'irrigation varient de façon importante en fonction des données climatiques ce qui soulève de nouveaux problèmes. L'eau nécessaire pour l'irrigation, essentiellement par aspersion, est prélevée surtout en rivière, de façon individuelle ou collective, réalimentée artificiellement par des réserves de haute montagne.

3.1.2 Les données nécessaires

Les hypothèses de travail nécessaires pour réaliser les simulations de croissance des cultures sous contraintes hydriques sont regroupées principalement dans les fichiers de données nécessaires à la simulation pour le modèle agronomique EPICPHASE. Elles fixent les paramètres du sol, de l'érosion, du climat, des itinéraires techniques (hors irrigation) et des conduites d'irrigation ainsi que la culture étudiée.

Le périmètre irrigable et le sol dépendent uniquement d'une parcelle de l'exploitation agricole donnée. Les caractéristiques du sol sont répertoriés dans le fichier de données nécessaires à EPICPHASE générées par expérimentation sur le site expérimental d'Auzeville. Il s'agit d'un des trois sols caractéristiques de la région retenue. C'est un sol profond argilo-sableux, de profondeur de 1,60 m avec une réserve utile importante, égale à 300 mm environ.

La culture sélectionnée pour les simulations est le maïs, en raison de son importance relative dans la zone étudiée. Les itinéraires techniques hors irrigation sont décrits par un calendrier type des opérations culturales hors irrigation qui a été réalisé à l'aide des recommandations des agronomes de l'INRA ainsi que de l'observation des pratiques des exploitants de la région et considéré comme optimisé. Il n'y a pas de rotation culturale sur plusieurs années. Le calendrier d'irrigation est défini de mi juin à fin août, mois qui correspondent aux périodes de floraison et de remplissage des grains. Il est constitué de tours d'eau espacés de 5 à 10 jours, avec des doses variant de 20 à 80 mm. Ce calendrier résume le comportement des agriculteurs limités en ressources disponibles, ce qui interdit des apports plus précoces en phase végétative, au profit des périodes plus sensibles à l'eau.

La quantité d'eau totale disponible au cours de la campagne peut être limitée par deux types de contraintes : la contrainte institutionnelle qui provient des risques de pénurie en période d'étiage et de

sécheresse et la contrainte technique qui est due à l'installation d'irrigation ainsi qu'à l'organisation de l'utilisation de la ressource. L'installation d'irrigation est définie par le volume d'eau disponible pour irriguer (en m^3/ha) ainsi que par sa capacité par tour caractérisée par une quantité minimale et une quantité maximale par apport. Les volumes d'irrigation utilisés sont compris entre 0 et $4500 m^3/hectare$ ¹⁸.

Les données économiques portent uniquement sur le profit de l'exploitant. Il se définit comme la différence entre le produit de la récolte (prix*rendement) et les coûts. Le prix de marché du maïs dans la région étudiée est en moyenne, de 1440 F/tonne. Ce prix de marché est connu pour chaque année. Les coûts totaux comprennent un terme variable lié à la consommation et un terme fixe lié aux autres frais. Les coûts fixes regroupent les frais d'engrais (750 F/ha), de semences (750 F/ha), de phytosanitaires (450 F/ha) et d'assurance grêle (200 F/ha); ils sont chiffrés à 2150 F/ha. Les coûts variables sont fonction du coût marginal du m^3/ha de la ressource évalué à 0,25 F/ha.

Pour appréhender la variabilité climatique, le modèle utilise les relevés météorologiques des années antérieures de la station agronomique d'Auzeville. Chacune des années est considérée comme un scénario climatique possible pour la campagne à venir. Nous disposons d'un fichier de 14 années climatiques de 1983 à 1996 contenant les relevés journaliers observés. Il couvre l'ensemble des situations climatiques possibles dans la région. Il permet d'étudier les problèmes de risque climatique pour la production.

3.2 Procédures de simulation et d'estimation

La formalisation primale de notre problème nécessite la connaissance de la fonction de production. Dans notre cas, la production étant le rendement de la culture, la fonction de production, $Y(.)$, n'est rien d'autre que la fonction de réponse à l'eau.

Il existe, dans la littérature, deux types d'approches pour décrire la relation entre rendement et apport d'eau total : l'approche descriptive du fonctionnement de la culture (Flinn et Musgrave, 1967; Dudley et al., 1971, par exemple) et l'approche statistique. Cette dernière vise à poser une forme fonctionnelle à la fonction de réponse à l'eau : fonction Cobb Douglas (Burt et Stauber, 1971; Hexen et Heady, 1978); fonction polynomiale d'ordre 2 (Hexen et Heady, 1978; Caswell et Zilberman, 1986); fonction Mitscherlich-Spillman (Hexen et Heady, 1978; Yaron et Dinar, 1982); fonction de type additivement séparable (Flinn et Musgrave, 1967; Burt et Dudley, 1973; Mc Guckin et al., 1987; Vedula et Musgrave, 1992) ou multiplicativement séparable (Rao et al., 1990); l'expression de Jensen (Tsakiris et Kiountouzis, 1984), qu'il faut ensuite estimer avec un nombre très important de données. L'approche descriptive repose généralement sur l'utilisation de modèles agronomiques de simulation de la croissance de la plante relativement complexes permettant d'estimer le rendement de la plante à partir de fichiers climatiques et des données d'apport d'eau. Généralement de même fonctionnement global, les modèles de simulation quantifient le rendement par trois étapes successives :

1. Estimation des valeurs journalières des facteurs déterminant le niveau de demande atmosphérique d'humidité de la plante c'est-à-dire, les évapotranspirations réelles et potentielles.
2. Estimation de l'offre journalière d'humidité de la plante et sa distribution dans la zone racinaire.

¹⁸Ces quantités correspondent aux déclarations moyennes des quantités d'eau totales utilisées par les agriculteurs de Midi-Pyrénées durant la campagne d'irrigation.

3. Estimation de l'interaction entre la demande et l'offre d'eau pour obtenir un rendement économique.

Flinn et Musgrave (1967) ont été les premiers économistes à tenter d'estimer une fonction de réponse à l'eau par simulations. Ensuite, cette approche a été largement reprise par de nombreux économistes agricoles. Nous avons opté pour cette approche.

3.2.1 Procédure de simulation des fonctions de réponse à l'eau et de profit

L'évaluation de la fonction de demande repose sur la connaissance des fonctions de réponse à l'eau et de profit. Nous avons conçu des programmes mathématiques permettant de générer, par simulations, un ensemble de données nécessaires pour procéder à l'estimation de ces fonctions. L'objectif de ces programmes est de fournir les couples de données (rendement, quantité totale de la ressource) et (profit, quantité totale de la ressource) au niveau optimisé, c'est-à-dire suite à la résolution d'un programme économique dynamique de prise de décisions (Bontemps et Couture, 1999).

Les fonctions de réponse à l'eau

Nous avons utilisé un modèle d'optimisation dynamique économique intégrant le modèle agronomique EPICPHASE afin de calculer les couples de points nécessaires pour évaluer les fonctions de réponse à l'eau.

Le modèle d'optimisation dynamique détermine les applications d'eau journalières afin de maximiser le rendement final sous l'ensemble des contraintes climatiques et techniques pour une quantité d'eau totale donnée. Il utilise le simulateur de culture pour prédire les rendements pour différentes stratégies d'irrigation. Au final, il identifie la stratégie d'irrigation optimale en considérant l'ensemble des rendements simulés. Le modèle agronomique EPICPHASE¹⁹ estime le rendement en fonction de l'ensemble des caractéristiques du problème, la biomasse cumulée, l'indice foliaire, et utilise le stress hydrique pour calculer la biomasse réelle. Cette procédure de simulation est répétée pour des volumes de ressources disponibles variant de 0 à 4500 m^3/ha . Nous obtenons ainsi un ensemble de couples de données (rendement optimisé-quantité d'eau totale).

Les fonctions de profit

Le même raisonnement que précédemment a été appliqué pour calculer les couples profits-quantité en modifiant ici le critère à optimiser qui devient le profit de l'agriculteur décrit par l'équation (1).

Nous obtenons alors un ensemble de données profits optimisés-quantité totale de la ressource permettant alors d'estimer la fonction de profit et de ce fait, la fonction de demande.

¹⁹Le modèle EPIC-Phase temps réel a été développé par la station d'agronomie INRA Toulouse à partir du modèle EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator). Il vise à remédier aux carences du modèle original relatives à la prévision de la dynamique de l'eau dans le système sol-plante et des effets des contraintes hydriques sur la production, en intégrant le découpage du cycle de croissance en phases phénologiques de sensibilité différentes aux stress hydriques et azotés. Fonctionnant à pas de temps journalier, c'est un modèle pluri-espèce et pluri-annuel qui permet de simuler la croissance de cultures en fonction de l'évolution des stocks d'eau et d'éléments minéraux du sol. Il décrit les principales relations régissant le système sol-climat-technique-plante. Ce modèle calcule la biomasse aérienne qui, à la récolte, est convertie par un indice de récolte, en rendement.

3.2.2 Procédure d'estimation non paramétrique des fonctions de réponse à l'eau, de profit et de demande

Le principe est ici d'estimer les fonctions sans aucune hypothèse établie sur les formes de ces fonctions en se basant uniquement sur les données observées. La méthode utilisée pour l'estimation de formes fonctionnelles inconnues a priori, repose sur des techniques économétriques développées ces dernières années (Härdle 1990). En tout point, on estime la fonction par une somme pondérée des observations la reflétant. L'estimateur est continu et permet donc de calculer et de représenter la fonction continûment. Cette technique a été appliquée afin de calculer et de représenter les fonctions de réponse à l'eau et de profit, d'où découle l'estimation de la fonction de demande.

Estimateur de la fonction de réponse à l'eau

Le modèle agronomique de simulation nous fournit les couples $(Q_i, Y_i)_{i=1, \dots, n}$, quantité totale d'eau-rendement, sur lesquels la procédure d'estimation repose. Chacun de ces couples est issu des simulations présentées dans la section précédente, nous ne disposons donc que d'un nombre de points limité à $n = 19$. La fonction inconnue $Y(\cdot)$ reliant la variable quantité au rendement est ensuite estimée ponctuellement. Pour toute quantité arbitraire d'eau q , nous pouvons estimer la fonction de réponse $\hat{Y}(q)$.

L'estimateur non paramétrique utilisé est alors construit comme une somme pondérée des observations Y_i , la pondération étant une fonction continue des quantités observées Q_i et du point de calcul q .

L'estimateur non paramétrique de la fonction de réponse à l'eau est ainsi la fonction :

$$\hat{Y}(q) = \frac{\sum_{i=1}^n Y_i \cdot K\left(\frac{Q_i - q}{h_y}\right)}{\sum_{i=1}^n K\left(\frac{Q_i - q}{h_y}\right)} \quad \forall q \in R \quad (5)$$

La fonction $K(\cdot)$, le *noyau*, est l'élément déterminant la pondération, cette fonction est choisie continue, différentiable, ce qui rend l'estimateur dérivable. Parmi l'ensemble des noyaux couramment utilisés, le noyau gaussien - $K(\cdot)$ est alors la densité de la loi normale centrée réduite - a été ici retenu²⁰.

Le paramètre h_y intervenant dans cette expression est la *fenêtre*, destinée à ajuster la pondération de chacun des termes de cette somme. C'est ainsi que l'on ajuste le degré de *douceur* de l'estimateur $\hat{Y}(\cdot)$. Le choix de ce paramètre est crucial et s'effectue suivant divers critères d'adéquation aux données (Vieu, 1993). Nous discuterons de son choix un peu plus loin dans cette section.

Estimateur de la fonction de profit

Conformément à la forme précédente (5), l'estimation de la fonction de profit repose sur les observations $(Q_i, \pi_i)_{i=1, \dots, n}$ des couples quantités-profits issus du programme d'optimisation. Pour toute quantité d'eau q , l'estimateur de la fonction de profit en ce point est donc :

²⁰L'utilisation d'autres noyaux comme le noyau d'Epanechnikov modifie sensiblement les estimations.

$$\widehat{\pi}(q) = \frac{\sum_{i=1}^n \pi_i \cdot K\left(\frac{Q_i - q}{h_p}\right)}{\sum_{i=1}^n K\left(\frac{Q_i - q}{h_p}\right)} \quad \forall q \in R \quad (6)$$

La fonction de profit ayant sa propre forme, la fenêtre utilisée ici, h_p , est donc supposée différente a priori de la fenêtre utilisée dans l'estimation de la fonction de réponse à l'eau ($h_p \neq h_y$).

Il est à noter que l'estimateur $\widehat{\pi}(q)$ est une somme de fonctions continues et dérivables (les pondérations); il est donc continu et dérivable par construction.

Estimateur de la fonction de demande

L'intérêt de cet estimateur non paramétrique, outre l'absence de spécification sur la fonction à estimer, réside dans sa dérivabilité. Il est clair que si l'estimateur $\widehat{\pi}(q)$ estime correctement la fonction de profit $\pi(q)$ en tout point, sa dérivée par rapport à q nous fournit un estimateur de $\frac{\partial \pi}{\partial q}(\cdot)$. Pour cela il suffit de dériver l'expression (6) par rapport à q .

Ainsi l'estimateur $\frac{\partial \widehat{\pi}}{\partial q}(\cdot)$ de $\frac{\partial \pi}{\partial q}(\cdot)$ est simplement la dérivée de l'estimateur $\widehat{\pi}(\cdot)$:

$$\frac{\partial \widehat{\pi}}{\partial q}(q) = \frac{\partial}{\partial q} \left(\frac{\sum_{i=1}^n \pi_i \cdot K\left(\frac{Q_i - q}{h_p}\right)}{\sum_{i=1}^n K\left(\frac{Q_i - q}{h_p}\right)} \right) \quad \forall q \in R$$

Soit encore :

$$\frac{\partial \widehat{\pi}}{\partial q}(q) = \frac{-\left(\sum_{i=1}^n \pi_i \cdot \frac{1}{h_p} \cdot K'\left(\frac{Q_i - q}{h_p}\right)\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n K\left(\frac{Q_i - q}{h_p}\right)\right) + \left(\sum_{i=1}^n \pi_i K\left(\frac{Q_i - q}{h_p}\right)\right) \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_p} \cdot K'\left(\frac{Q_i - q}{h_p}\right)\right)}{\left(\sum_{i=1}^n K\left(\frac{Q_i - q}{h_p}\right)\right)^2}$$

Cette expression définissant l'estimateur $\frac{\partial \widehat{\pi}}{\partial q}(q)$, n'est elle même qu'une somme pondérée des profits observés π_i , la pondération étant cette fois plus complexe. L'estimateur garde cependant son caractère continu et dérivable, puisque la pondération repose sur le noyau $K(\cdot)$ et sa dérivée $K'(\cdot)$.

La même procédure sera appliquée pour calculer l'élasticité sur la base des couples générés par cet estimateur.

Choix des fenêtres

Comme dans toute estimation non paramétrique, le choix de la fenêtre est un élément déterminant. Une fenêtre trop petite donnera une fonction très accidentée, passant au plus près des observations, tandis qu'une fenêtre trop grande, à l'inverse, gommara toute inflexion et restituera une courbe presque linéaire. Il existe divers critères de sélection de la fenêtre (Vieu, 1993), certains théoriques (*plug-in*), d'autres reposant entièrement sur les données (*Validation croisée*).

Ces procédures ne sont toutefois pas entièrement satisfaisantes, surtout lorsque le nombre d'observations est faible, ce qui est le cas ici. Nous nous sommes donc servis des valeurs fournies par les

procédures de validation croisée mises en œuvre pour les différents estimateurs, comme références pour le choix de nos fenêtres. Ainsi nous avons déterminé la fenêtre de référence h_y^* minimisant le critère de validation croisée mesurant l'ajustement de l'estimateur $\hat{Y}(\cdot)$ aux données $(Q_i, Y_i)_{i=1, \dots, n}$, ainsi que la fenêtre h_p^* minimisant le critère d'ajustement de $\hat{\pi}(\cdot)$ aux données $(Q_i, \pi_i)_{i=1, \dots, n}$.

Nous avons ensuite procédé à différentes estimations avec des fenêtres "légèrement" plus petites que ces fenêtres de référence au vu des estimations, afin de mieux refléter les inflexions des courbes et de palier le problème de "sur-lissage" constaté avec les fenêtres h_y^* et h_p^* . Face à l'arbitraire que représente le choix de ces paramètres²¹, nous avons cependant constaté une certaine robustesse de nos estimateurs aux valeurs des fenêtres choisies.

La fenêtre de l'estimateur de la fonction de demande est ici la même que celle utilisée pour l'estimateur de la fonction de profit. En effet, comme le remarque Härdle (1990, p. 160), si l'estimateur estime convenablement la fonction inconnue, la dérivée de cet estimateur doit estimer convenablement la dérivée recherchée. Cela signifie en particulier que, si la fenêtre est correctement ajustée pour l'estimateur, elle l'est également pour la dérivée de cet estimateur.

4 Résultats

Nous nous sommes limités à l'analyse des séquences de décisions optimales dans le cas de trois

FIG. 2: Fonctions de réponse à l'eau estimées pour les trois scénarios climatiques : 1989, 1991 et 1993.

scénarios climatiques : les années 1989 dite sèche, 1991 dite normale et 1993 dite humide²² afin

²¹Il est cependant plus arbitraire de spécifier un modèle, que de choisir une fenêtre.

de représenter au mieux la variabilité climatique de la région étudiée. Les fonctions de réponse à

FIG. 3: Fonctions de profit estimées pour trois scénarios climatiques : 1989, 1991 et 1993.

l'eau sont représentées par la figure 2. La fonction de réponse croît pour atteindre un maximum de $12,79 T/ha$ avec $3200 m^3/ha$ en 1989 puis décroît. En 1991, le rendement est maximum ($10,59 T/ha$) pour une quantité totale de $2600 m^3/ha$. L'année dite humide 1993 se caractérise par un rendement maximal plus faible ($11,24 T/ha$) avec $1650 m^3/ha$.

Les fonctions de profit sont représentées par la figure 3. Elles ont un profil semblable à celui de la fonction de production, la partie variable des coûts étant relativement faible. Le profit est maximal ($10534,93 F/ha$) en 1989 pour un volume de ressource disponible de $2750 m^3/ha$. En 1991, il s'élève à $8382,99 F/ha$ pour $1700 m^3/ha$ tandis qu'en 1993, il est égal à $6235,78 F/ha$ avec $1350 m^3/ha$. Les quantités d'eau nécessaires pour atteindre un profit maximal sont toujours plus faibles que celles nécessaires pour obtenir un rendement maximal, pour l'ensemble des scénarios climatiques, les coûts ayant un impact conséquent.

Par la représentation graphique des fonctions de demande en eau (figure 4), nous obtenons un résultat qui paraissait a priori intuitif. La demande en eau dépend fortement du climat. Pour un climat sec, cette dernière sera plus élevée, à la différence, pour un scénario type humide, elle sera moindre.

La demande en eau est analysée par type de climat. Il apparaît des différences entre les scénarios climatiques. La demande en eau n'est pas linéaire, quel que soit le climat. Ces fonctions de demande

²²Ces caractéristiques climatiques sont définies par la comparaison entre le rendement potentiel et le rendement en sec : plus cette différence est faible, plus l'année sera considérée comme humide et moins l'irrigation sera efficace dans le sens où elle aura un impact moindre sur le rendement final.

FIG. 4: Fonctions de demande inverses estimées pour trois scénarios climatiques : 1989, 1991 et 1993.

en eau présentent plusieurs points d'inflexion et peuvent ainsi être découpées en plusieurs zones. Elles présentent une tendance générale identique liée à la forme générale de la fonction de profit.

Les prix maximum sont relativement faibles. Pour des prix allant de $0,6 F/m^3$ à $2,61 F/m^3$, la demande en eau est nulle.

A partir de $2900 m^3/ha$ en année sèche, $1700 m^3/ha$ en année normale, et $1350 m^3/ha$ en année humide, l'agriculteur n'a plus d'intérêt économique à irriguer. Par conséquent, au delà de ces quantités, il n'est plus efficient pour l'exploitant agricole d'irriguer. Ces quantités semblent a priori relativement faibles sauf pour une année sèche car, pour un tel scénario, l'apport hydrique a d'autant plus de conséquences sur le rendement final. Selon le scénario climatique donné, la demande en eau sera d'autant plus forte que la pluviométrie sera faible. Ce résultat confirme l'intuition quant à l'impact du climat sur la demande en eau utilisée à des fins d'irrigation. Pour l'année humide, la demande en eau est très faible ; ceci s'explique par le fait que les apports pluviométriques de cette année couvrent de façon relativement satisfaisante les besoins hydriques de la plante, les apports d'irrigation ayant de ce fait un impact moindre. La demande en eau est, dans ce cas, peu sensible au prix de la ressource.

Les élasticités prix de la demande, présentées dans le tableau 1, confirment ces remarques ainsi que la majorité des résultats obtenus dans les études empiriques précédentes (Montginoul et Rieu, 1996 ; Iglesias et al., 1998 ; Varela-Ortega et al., 1998) : la demande en eau est inélastique pour des prix faibles et devient élastique pour des prix plus élevés. Les résultats sont présentés pour différents niveaux de prix simulés pour les trois années climatiques considérées.

Pour des prix de la ressource faibles : $p < 1,57 F/m^3$ en année sèche, $p < 0,77 F/m^3$ en année normale et $p < 0,27 F/m^3$ en année humide, la demande en eau est inélastique jusqu'à ce

seuil, quel que soit le climat. Au dessus de ce prix seuil, des fluctuations de la consommation de la ressource apparaissent plus prononcées.

L'ensemble de ces résultats présentent un intérêt pour la gestion de la ressource ainsi que pour la définition de politique de prix de l'eau. Par exemple, une hausse du prix de la ressource de 0 à $0,9 F/m^3$ en année sèche, aura peu de conséquence sur la consommation ; à la différence, pour une année humide, cette politique annulera la consommation. Par conséquent, ces aspects doivent être pris en considération dans la définition de la tarification de la ressource. Si l'objectif de la politique est de réduire fortement la consommation de la ressource, alors le prix de l'eau doit être fixé à des niveaux relativement élevés afin d'affecter la demande en eau.

Prix de l'eau (en m^3/h)	Elasticités-prix de la demande		
	1989	1991	1992
0,1	-0,011	-0,020	-0,128
0,5	-0,067	-0,272	-2,330
0,75	-0,128	-0,943	0,00
1	-0,238	-2,072	0,00
1,5	-0,861	-3,113	0,00
2	-2,290	0,00	0,00
2,5	-7,637	0,00	0,00

TAB. 1: Valeurs des élasticités prix de la demande pour les trois scénarios climatiques.

5 Conclusion

Cet article présente une méthode pour dégager la fonction de demande en eau d'irrigation basée sur la détermination de la disposition maximale à payer de l'exploitant agricole. La fonction de demande est générée par un modèle de programmation mathématique de prise de décisions séquentielle et par la procédure d'estimation non paramétrique du noyau de convolution, pour différents scénarios climatiques.

Par les résultats obtenus avec notre modèle de simulation appliqué à la région du Sud-Ouest de la France, nous pouvons conclure que notre méthode d'évaluation de la demande en eau agricole est validée.

Les modifications de la demande en eau pour l'irrigation à des changements de prix de la ressource sont différentes selon le climat considéré. Initialement inélastique pour des prix faibles, la demande en eau à usage agricole tend à être élastique au dessus d'un prix seuil, fonction du climat considéré. Par conséquent, des politiques de prix de la ressource doivent intégrer cet aspect et être spécifiques au climat considéré.

Notre méthode - couplage programmation mathématique et estimation non paramétrique - s'avère adaptée à des situations plus générales où l'on cherche à décrire une relation ou un phénomène soit en ne disposant ni de données expérimentales ni de la forme spécifique à estimer soit en ayant quelques données expérimentales réelles sans pour autant connaître la forme de la relation analysée.

L'ensemble des résultats obtenus doivent être étendus à l'ensemble de l'exploitation agricole et prendre en compte, de ce fait, les possibilités de conflits et de substitution entre les différentes cultures irriguées. Des fonctions de demande en eau peuvent alors être dégagées pour une exploitation agricole donnée. Par une définition de différentes exploitations agricoles types, les résultats peuvent être extrapolés et ainsi un raisonnement macro-économique peut être envisagé quant à la définition des politiques de tarification de la ressource.

Références

- ANDERSON T.L. [1983], (Ed.), *Water rights*, Cambridge, Massachussets, Balinger.
- BONTEMPS C., COUTURE S. [1999], " Dynamique et incertitude dans la gestion des ressources naturelles et agricoles dans un contexte de rareté : application à l'irrigation ", *Document de travail ERNA INRA*.
- BURT O.R., STAUBER M.S. [1971], " Economic analysis of irrigation in subhumid climate ", *American Journal of Agricultural Economics*, 53(1), p. 33-46.
- BURT O.R., DUDLEY N.J. [1973], "Stochastic reservoir management and system design for irrigation ", *Water Resource Research*, 9(3), p. 507-522, june.
- BUTCHER W.S. [1971] " Stochastic dynamic programming for optimum reservoir operation ", *Water Resources Bulletin*, 7(1), p. 115-123.
- CABELGUENNE M., DEBAEKE P. [1995], *Manuel d'utilisation du modèle EWQTPR (Epic-Phase temps réel) version 2.13*, Ed. Station d'Agronomie Toulouse INRA.
- CASWELL M., LICHTENBERG E., ZILBERMAN D. [1990], " The effects of pricing policies on water conservation and drainage ", *American Journal of Agricultural Economics*, p. 883-890, november.
- CASWELL M., ZILBERMAN D. [1986], " The effects of well depth and land quality on the choice of irrigation technology ", *American Journal of Agricultural Economics*, 68, p. 798-811.
- CHAMBERS R.G., JUST R.E. [1989], " Estimating multioutput technologies ", *American Journal of Agricultural Economics*, p. 980-995, november.
- CONNOR J.R., GLYER J.D., ADAMS R.M. [1989], " Some further evidence on the derived demand for irrigation electricity : a dual cost function approach ", *Water Resource Research*, 25(7), p. 1461-1468.
- DUDLEY N.J., HOWELL D.T., MUSGRAVE W.F. [1971], " Optimal intraseasonal irrigation water allocation ", *Water Resources Research*, 7(4), p. 770-88.
- DUDLEY N.J., HOWELL D.T., MUSGRAVE W.F. [1972], " Irrigation planning 3 : the best size of irrigation water allocation ", *Water Resources Research*, 8(1), p. 7-17.
- Enquête Agreste [1996], " Les pratiques culturelles sur grandes cultures en 1994 ", *Agriculture*, Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation, 85, août.
- FLINN J.C., MUSGRAVE W.F. [1967], " Development and analysis of input-output relations for irrigation water ", *The Australian Journal of Agricultural Economics*, 11(1), p. 1-19.
- GARRIDO A., VARELA-ORTEGA C., SUMPSI J.M. [1997], " The interaction of agricultural pricing policies and water districts' modernization programs : a question with unexpected answers ", *Paper presented at the Eighth Conference of the European Association of Environmental and Resource Economists, Tilburg, The Netherlands, june 26-28*.
- GOULTER I.C., TAI F.-K. [1985], " Practical implications in the use of stochastic dynamic programming for reservoir operation ", *Water Resources Bulletin*, 21(1), p. 65-74.
- HÄRDLE , [1990], " Applied nonparametric regression ", *Econometric society monographs*, Cambridge University Press.
- HASSINE N.B.H., THOMAS A. [1997], " Agricultural production, attitude towards risk, and the demand for irrigation water : the case of Tunisia. " it Working paper, Université de Toulouse..
- HEXEM R.W., HEADY A.O. [1978], *Water production functions for irrigated agriculture*, The Iowa State University Press, Ames, Iowa.
- IGLESIAS E., GARRIDO A., SUMPSI J., VARELA-ORETGA C. [1998], " Water demand elasticity : implications for water management and water pricing policies. " *Paper presented at the World*

Congress of Environmental and Resource Economists, Venice, Italy, June 26-28.

- JOHNSON S.L., ADAMS R.M., PERRY G.M. [1991], " The on-farm costs of reducing groundwater pollution ", *American Journal of Agricultural Economics*, p. 1063-73, november.
- JUST R.E., ZILBERMAN D., HOCHMAN E. [1983], " Estimation of multicrop production functions ", *American Journal of Agricultural Economics*, p. 770-780, november.
- JUST R.E., ZILBERMAN D., HOCHMAN E., BAR-SHIRA Z. [1990], " Input allocation in multicrop systems ", *American Journal of Agricultural Economics*, p. 200-209, february.
- Mc GUCKIN J.T., MAPEL C., LANSFORD R., SAMMIS T. [1987], " Optimal control of irrigation scheduling using a random time frame ", *American Journal of Agricultural Economics*, p. 123-33, february.
- MICHALLAND B. [1995], " Approche économique de la gestion de la ressource en eau pour l'usage d'irrigation ", Thèse pour le doctorat de l'Université de Bordeaux.
- MONTGINOUL M., RIEU T. [1996], " Instruments économiques et gestion de l'eau d'irrigation en France ", *La Houille Blanche*, 8, p. 47-54.
- MOORE M.R., GOLLEHON N.R., NEGRI D.H. [1990], " Alternative forms for production functions of irrigated crop ", *The Journal of Agricultural Economics Research*, 44(3), p. 16-32.
- MOORE M.R., NEGRI D.H. [1992], " A multicrop production model of irrigated agriculture, applied to water allocation policy of the bureau of reclamation ", *Journal of Agricultural and Resources Economics*, 17, p. 30-43.
- MOORE M.R., GOLLEHON N.R., CARREY, M.B. [1994], " Alternative models of input allocation in multicrop systems : irrigation water in the Central Plains, United States ", *Agricultural Economics*, 11, p. 143-158.
- MOORE M.R., GOLLEHON N.R., CARREY M.B. [1994], " Multicrop production decisions in western irrigated agriculture : the role of water price ", *American Journal of Agricultural Economics*, p. 359-74, november.
- NEGRI D.H., BROOKS D.H. [1990], " Determinants of irrigation technology choice ", *Western Journal of Agricultural Economics*, 15, p. 213-223, december.
- NIESWIADOMY M.L. [1988], " Input substitution in irrigated agriculture in the High Plains of Texas, 1970-1980 ", *Western Journal of Agricultural Economics*, 13, p. 63-69, july.
- OGG C.W., GOLLEHON N.R. [1989], " Western irrigation response to pumping costs : a water demand analysis using climatic regions ", *Water Resource Research*, 25, p. 767-773, may.
- RAO N.H., SARMA P.B.S., CHANDER S. [1990], " Optimal multicrop allocation of seasonal and intraseasonal irrigation water ", *Water Resources Research*, 26(4), p. 551-559.
- SCHAIBLE G.D. [1997], " Water conservation policy analysis : an interregional, multi-output, primal-dual optimization approach ", *American Journal of Agricultural Economics*, 79, p. 163-177, february.
- SHARPLEY A.N., WILLIAMS J.R. [1990], " EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator 1. Model Documentation. " *United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service Technical Bulletin*, 1768, p. 1-234.
- TSAKIRIS G., KIOUNTOUZIS E. [1984], " Optimal intraseasonal irrigation water distribution " *Advances in Water Resources*, 7, p. 89-92.
- VARELA-ORTEGA C., SUMPISI J.M., GARRIDO A., BLANCO M., IGLESIAS, E. [1998], " Water pricing policies, public decision making and farmers' response : implications for water policy ", *Agricultural Economics*, 19, p. 193-202.
- VEDULA S., MUJUMDAR P.P. [1992], " Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops ", *Water Resources Research*, 28(1), p. 1-9.

VIEU P., [1993], " Bandwidth selection for kernel regression : a survey ", in *Computer Intensive Methods in Statistics*, Vol. 1, W. Härdle et L. Simar eds., Physica-Verlag.

VICKNER S.S., HOAG D.L., FRASIER W.M., ASCOUGH II, J.C. [1998], " A dynamic economic analysis of nitrate leaching in corn production under nonuniform irrigation conditions ", *American Journal of Agricultural Economics*, 80, p. 397-408, may.

WILLIAMS J.R., DYKE P.T., FUCHS W.W., BENSON V., RICE O.W., TAYLOR E.D. [1990], " EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator : 2. User Manual ", *United States Department of Agriculture, Agricultural Research Service Technical Bulletin*, 1768, p. 235-262.

YARON D., DINAR A. [1982], " Optimal allocation of farm irrigation water during peak seasons ", *American Journal of Agricultural Economics*, p. 681-689, november.

ZAVALETA L.R., LACEWELL R.D., TAYLOR C.R. [1980], " Open-loop stochastic control of grain sorghum irrigation levels and timing ", *American Journal of Agricultural Economics*, p. 785-792, november.