

RAPPORT DE CONTRAT

**G. I. S. MICROECONOMIE DE
L'ENVIRONNEMENT**

POLLUTIONS DIFFUSES ET RESSOURCES RENOUVELABLES

**AMIGUES Jean-Pierre, BONTEMPS Christophe
et Alban THOMAS**

ERNA-INRA, Unité ESR TOULOUSE

Septembre 1998

PLAN DU RAPPORT :

1. PREAMBULE	4
2.DISPOSITIF D'ETUDE	5
2.1. <i>SOUS-PROJET 2 : AEP ET TARIFICATION.</i>	5
2. 2. <i>SOUS-PROJET 3 : IRRIGATION ET POLLUTIONS DIFFUSES</i>	6
3. AEP ET TARIFICATION	8
3. 1. <i>QUESTIONS ÉTUDIÉES ET CONTEXTE SOCIO-ÉCONOMIQUE</i>	8
3. 2. <i>CONTEXTE SCIENTIFIQUE.</i>	8
3. 3. <i>MÉTHODOLOGIE</i>	12
3. 4. <i>PREMIERS RÉSULTATS</i>	14
3.5. <i>CONCLUSION</i>	16
4. IRRIGATION ET POLLUTIONS DIFFUSES.	17
4. 1. <i>DEMANDE AGRICOLE EN EAU.</i>	17
4. 1. 1. <i>QUESTIONS ÉTUDIÉES ET CONTEXTE SOCIO-ÉCONOMIQUE</i>	17
4. 1. 2. <i>CONTEXTE SCIENTIFIQUE</i>	19
4. 1. 3. <i>MÉTHODOLOGIE</i>	21
4. 1. 4. <i>PREMIERS RÉSULTATS :</i>	23
4. 1. 5. <i>CONCLUSION</i>	26
4. 2. <i>RÉGULATION DES POLLUTIONS DIFFUSES D'ORIGINE AGRICOLE</i>	27
4. 2. 1. <i>QUESTIONS ÉTUDIÉES ET CONTEXTE SOCIO-ÉCONOMIQUE</i>	27
4. 2. 2. <i>CONTEXTE SCIENTIFIQUE</i>	28
4.2.3. <i>MÉTHODOLOGIE</i>	30
4.2.4. <i>PREMIERS RÉSULTATS</i>	32
5. MOYENS MIS EN OEUVRE ET HISTORIQUE DE LA RECHERCHE.	36

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES 98.	37
7. PUBLICATIONS 97	38
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CITEES.	40
TABLE DES GRAPHIQUES ET TABLEAUX.	44

1. PREAMBULE

Le présent rapport a pour objet de faire la synthèse de l'état actuel des recherches conduites au thème 3 « *pollutions diffuses et ressources renouvelables* ». Avant d'en décrire l'état d'avancement, il paraît opportun de rappeler succinctement les objectifs poursuivis et le dispositif d'étude mis en place. C'est l'objet de ce préambule. Les recherches menées dans ce thème s'inscrivent dans une perspective d'élaboration de modèles économiques de gestion intégrée d'aquifères, tant au plan de leurs disponibilités physiques que de leur vulnérabilité face à divers phénomènes de pollution. Les préalables indispensables à cette élaboration sont, d'une part d'acquérir une bonne appréhension des déterminants des demandes et usages de l'eau, et d'autre part de parvenir à traduire en termes économiques les conséquences des contraintes de disponibilité pesant sur la ressource, en quantité et en qualité. Une fois ces étapes franchies, il sera alors possible d'engager une réflexion sur les modalités d'adéquation des besoins à la ressource disponible, réflexion axée sur les outils de régulation (tarification, normes et quotas d'utilisation, réglementation et contrats) et les potentialités des instruments économiques pour atteindre des objectifs de politique de l'eau. La philosophie générale de l'étude se fonde sur la conviction qu'il est impossible de réfléchir de manière globale l'instrumentation économique d'une politique de l'eau sans une vision claire de l'ensemble des déterminants des usages de l'eau et des conditions de mise à disposition de la ressource aux usagers.

L'étude de la demande est divisée en grandes catégories : demande en eau potable des ménages, demande des industriels et demande agricole. Parallèlement à l'analyse de ces demandes marchandes, nous nous intéressons également aux usages non marchands de l'eau et des milieux aquatiques (usages récréatifs, protection et conservation des milieux, en particulier de la biodiversité). Ces dernières recherches sont poursuivies spécifiquement au thème 1 « *économie de la protection de la nature* » coordonné par B. Desaignes.

L'analyse économique de « l'offre » de ressource comprend un volet essentiellement méthodologique et un volet appliqué. Le volet méthodologique porte sur la problématique d'une gestion durable à long terme de la ressource en eau. Le volet appliqué comprend plusieurs opérations de recherche : gestion durable de l'aquifère bordelais menacé d'intrusion saline en provenance de l'Atlantique, évaluation des coûts de potabilisation et de fourniture d'eau potable en Lorraine, étude de l'adéquation entre l'irrigation par pompage et les disponibilités en eau de la nappe de Beauce.

L'étude des problèmes posés par les pollutions diffuses, en particulier d'origine agricole, comprend également un volet méthodologique et appliqué. Le premier concerne les modalités d'une régulation contractuelle de ce type de pollutions. Le second s'intéresse aux conséquences des pratiques agricoles de fertilisation et d'irrigation sur la pollution de l'eau dans le Lot-et-Garonne.

2.DISPOSITIF D'ETUDE

Rappelons les objectifs et décrivons les dispositifs d'étude mis en place dans chacun des sous projets composant le thème 3 (sous-projets 2 et 3 du contrat).

2.1. Sous-projet 2 : AEP et tarification.

Les objectifs de la recherche sont d'une part d'effectuer une étude économétrique des déterminants de la demande en eau potable des ménages, et d'autre part d'analyser à la lumière des résultats de cette étude les effets de différentes modalités de tarification de l'eau sur les comportements de consommation d'eau des ménages.

Le dispositif d'étude mis en place s'organise autour d'une collaboration engagée en 1997 entre l'ENGEES (CEMAGREF de Strasbourg), le BETA-CNRS de Strasbourg, l'Agence de l'Eau Rhin-Meuse et la Compagnie Générale des Eaux. Cette collaboration a pour but de constituer et d'exploiter une base de données individuelles de consommation d'eau potable par les ménages strasbourgeois. Cette base rassemble des données de caractéristiques individuelles des ménages (revenus, caractéristiques socio-économiques), des données de tarification et de consommation individuelle (factures d'eau). La nature précise des données recueillies et les premiers résultats d'estimation de fonction de demande auquel elles ont permis d'aboutir sont présentés à la section 3 du rapport. Un travail de collecte de données analogue a été entrepris sur le département de la Gironde. Les données recueillies rassemblent des données issues d'enquêtes du Conseil Général de la Gironde auprès des syndicats de distribution, données complétées par des données individuelles de consommation fournies pour la ville de Bordeaux par la Lyonnaise des Eaux, gestionnaire délégué, de données INSEE de caractéristiques socio-économiques des ménages concernés, ainsi que de données de revenus issues des services de la fiscalité. Les résultats économétriques d'estimation de fonction de demande en eau potable pour la Gironde sont présentés section 3.

Il est intéressant de remarquer que les coefficients estimés de la demande en AEP à Strasbourg et à Bordeaux sont très comparables. Ils restent aussi globalement cohérents avec les premières estimations conduites sur les grandes agglomérations du bassin Loire-Bretagne, bien que ces dernières aient été calculées à un niveau de détail nettement plus grossier. Sous réserve bien entendu de confirmation à partir d'autres cas, on peut raisonnablement espérer aboutir à une représentation homogène de la fonction de demande en AEP dans les grandes agglomérations françaises.

Un volet complémentaire de l'étude ENGEES-CGE concerne l'analyse fine des comportements de

consommation quotidiens des ménages. Il est bien connu que la répartition intrajournalière de la consommation est très hétérogène, caractérisée par de fortes pointes en début de matinée et en soirée. Ceci n'est pas sans poser des problèmes de maintien de la qualité aux gestionnaires des services d'adduction. L'équipe collabore à une réflexion sur les modalités d'une tarification binôme par tranches adaptée à un objectif de lissage des consommations et d'économie d'eau. Deux thèses de doctorat financées MESR sont engagées sur le sous-projet 2 ainsi qu'une thèse cofinancée INRA-CEMAGREF.

2. 2. Sous-projet 3 : Irrigation et pollutions diffuses

Le sous-projet s'intéresse aux impacts de l'activité agricole sur les disponibilités et la qualité de la ressource en eau. Il comprend deux axes. Le premier concerne l'étude de la demande agricole en eau à des fins d'irrigation dans les régions de grande culture. Le second porte sur l'analyse des déterminants et des possibilités de régulation des pollutions diffuses d'origine agricole, en particulier par les fertilisants azotés. L'originalité de l'étude portant sur l'irrigation est d'introduire explicitement la dimension risquée des choix des exploitants agricoles dans l'analyse des déterminants de la demande agricole en eau. La recherche sur la régulation des pollutions diffuses est également originale dans la mesure où elle aborde les potentialités d'une coopération entre les agriculteurs pour atteindre un objectif commun de maîtrise de la pollution azotée à l'échelle d'un petit territoire ou bassin versant. Le caractère novateur de ces démarches de recherche suppose des investissements méthodologiques importants. Les deux axes comprennent donc des volets théoriques et appliqués.

Le dispositif d'étude de l'irrigation se fonde sur l'utilisation d'un modèle agronomique de conduite de culture, dynamique et pluri-espèces, le modèle EPIC, à des fins de simulations de conduite optimale de l'irrigation en univers aléatoire au cours d'une campagne culturale. Une version étendue de ce modèle, développée par l'INRA-Agronomie Toulouse, permet de calculer les rendements potentiels d'une ou plusieurs cultures selon différents paramètres de conduite agricole, de sol et de climat. Il a été calibré et validé sur des caractéristiques pertinentes des exploitations de grande culture du sud-ouest de la France et les scénarios climatiques régionaux. L'équipe développe un module économique de construction des coûts de conduite d'une campagne à l'échelle de l'exploitation agricole incorporant explicitement les contraintes de disponibilités en temps de l'agriculteur (calendriers opératoires). Les simulations d'une tactique optimale d'irrigation sont conduites à partir du couplage de ce module économique et du module agronomique EPIC. L'objectif est ensuite d'étudier les réactions en matière d'irrigation d'exploitants agricoles confrontés à différentes modalités de tarification de l'eau ou d'allocation par quotas.

En parallèle à cette étude, l'équipe a entrepris une réflexion sur la gestion de l'irrigation dans la Beauce, en collaboration avec l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne. Le dispositif d'étude est le suivant. Un modèle de prévision de l'évolution des niveaux de la nappe est en cours de développement à partir d'un modèle hydrogéologique conçu par l'Agence. La collecte de données agricoles (références agronomiques et répartition régionale des assolements) a permis de construire des fonctions de réponse à l'eau pour les principales cultures pratiquées dans la Beauce et d'en déduire des fonctions de demande d'eau par culture. Par croisement de ces demandes avec les données d'assolement, on a pu simuler les conséquences sur les prélèvements et les revenus des agriculteurs de différents systèmes de tarification ou d'allocation de l'eau par quotas (cf. section 4).

Le dispositif d'étude des pollutions diffuses s'articule autour d'un volet essentiellement théorique et d'un volet appliqué. L'étude théorique porte sur l'intérêt d'une coopération entre agriculteurs pour réaliser un objectif de contrôle de leurs pollutions. On montre que la coopération permet de réduire substantiellement le montant des incitations (pénalités ou subventions) à donner aux agriculteurs pour atteindre un objectif de réduction de la pollution lorsque celle-ci est diffuse (non observable individuellement) et partiellement aléatoire (la pollution constatée n'étant qu'imparfaitement corrélée aux comportements des agriculteurs). L'attitude coopérative ou non des agriculteurs étant difficilement connue *ex ante*, une solution possible est de proposer un menu de contrats conçus pour les différents types possibles d'exploitants de manière à les conduire à des choix discriminants.

Le volet appliqué de la recherche consiste en une analyse économétrique des pratiques agricoles de fertilisation à partir d'observations d'exploitants agricoles du Lot-et-Garonne. Une collaboration engagée avec le CGER du Lot-et-Garonne a permis de collecter des données comptables et de pratiques de fertilisation sur un échantillon représentatif d'exploitants du département. Ces données ont été croisées avec des données climatiques et des données de qualité de l'eau fournies par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne afin d'étudier les corrélations entre pratiques de fertilisation et la contamination par les nitrates. Les données comptables permettent ensuite de simuler l'effet de différents systèmes de régulation des apports d'engrais sur les coûts de production, les revenus des agriculteurs, et l'évolution des teneurs en nitrates des eaux départementales. L'objectif est de tester sur ces bases les performances des systèmes de régulation élaborés dans la première partie de l'étude.

Le présent rapport est organisé comme suit. Dans les deux sections suivantes on décrit pour chaque sous-projet les questions étudiées, la méthodologie d'analyse adoptée, les données rassemblées pour la mettre en œuvre, et les premiers résultats obtenus. Puis l'on présente brièvement les moyens humains mobilisés dans le cadre de ce projet, accompagné d'un court historique. La dernière partie conclut et décrit les perspectives 98 de la recherche. En annexes on trouvera les références des publications issues du travail.

3. AEP ET TARIFICATION

3. 1. Questions étudiées et contexte socio-économique

L'objectif poursuivi est d'aboutir à une représentation des déterminants de la demande en eau des ménages, pertinente au niveau national, mais fondée sur une approche micro-économique des comportements des consommateurs. Ce projet vise à répondre à diverses préoccupations de la collectivité et des pouvoirs publics. La première concerne le fort accroissement du prix de l'eau potable en France depuis cinq ans. Cette augmentation est souvent apparue peu ou mal justifiée aux yeux du grand public. Par ailleurs de fortes incertitudes demeurent quant aux tendances futures d'évolution du prix de l'eau. Deux optiques s'opposent à cet égard. La première part du principe que le prix de l'eau antérieur était faible et ne reflétait pas le coût réel de fourniture de la ressource aux usagers. Dans ces conditions, l'accroissement du prix de l'eau correspond à un rattrapage et ce prix devrait tendre maintenant à se stabiliser. La seconde optique insiste sur le probable resserrement des contraintes de qualité de l'eau imposées par l'Union Européenne. Une poursuite du mouvement d'augmentation du prix de l'eau serait alors inévitable. Le point central du débat est ici la question des coûts de fourniture et d'assainissement de l'eau. L'équipe a mis en place une opération de recherche spécifique sur cette question (cf. section 6).

Un autre aspect du problème concerne l'impact des hausses de prix de l'eau sur le comportement des consommateurs et leurs revenus. Lorsque le prix de l'eau était faible, on pouvait considérer que la consommation des ménages était relativement inélastique et déterminée essentiellement par leurs équipements. Confrontés à des prix plus élevés, les ménages peuvent être conduits à économiser l'eau. A plus long terme, ils devraient préférer des équipements plus économes en eau, même plus coûteux que les équipements actuels. Comprendre les déterminants de ces comportements requiert l'estimation de fonctions de demande en AEP. Avant de décrire la méthodologie adoptée décrivons brièvement le contexte scientifique de la recherche.

3. 2. Contexte scientifique.

L'essentiel des études de la demande en AEP a été conduit aux Etats-Unis. Beaucoup moins d'études sont disponibles en Europe et à l'exception d'un travail de P. Point, aucune estimation de la demande en AEP n'a été faite en France.

Les premiers travaux américains (Howe et Linaweaver, 1967; Gibbs, 1978 ; Danielson, 1979 ; Foster et Beattie, 1979) ont été menés dans des régions des Etats-Unis confrontées à des sécheresses récurrentes (le Sud-Ouest essentiellement). L'objectif de ces travaux était de réunir l'information nécessaire à une analyse des performances d'outils de régulation de la demande et d'incitation à l'économie d'eau (rationnements, actions d'éducation et de sensibilisation, tarifications multi tranches ou simplement relèvement du prix de l'eau). Ces recherches se sont vraiment développées dans les années 80 avec une plus grande attention portée à la formulation économique du problème de décision des consommateurs et aux traitements économétriques des données (Billings, 1982; Schefter et David, 1985; Chicoine et Ramamurthy, 1986; Nieswiadomy et Molina, 1989). La période récente se caractérise par des études européennes plus nombreuses, une attention plus importante pour les conséquences en termes de bien-être des tarifications de l'eau pratiquées, l'introduction de considérations de moyen long terme dans l'analyse de la demande (Point, 1993; Hansen, 1996; Agthe et Billings, 1996; Renwick et Archibald, 1997; Höglund, 1997).

Estimer des fonctions de demande en AEP pose des problèmes classiques en économétrie de la demande, ainsi que certains problèmes spécifiques au bien étudié et à ses modalités de mise à disposition aux consommateurs.

Tout d'abord les économistes s'accordent largement sur le fait que l'eau n'ayant pas de substitut, seul le prix de l'eau courante doit être inclus dans la fonction de demande. Ce point soulève au moins deux difficultés. La première concerne la non prise en compte de la consommation d'eau en bouteille dans la demande en AEP. On peut justifier cette non prise en compte en arguant du faible volume relatif de la consommation d'eau destinée strictement à l'alimentation humaine dans le volume total consommé. Il n'en est toutefois pas de même au niveau de la dépense totale. Un ménage de 4 personnes consommant 5 litres d'eau en bouteille par jour à 1 F le litre, dépense 1725 F/an sur ce poste alors que la facture moyenne d'eau d'un ménage français est de l'ordre de 2500 F/an. Vu en termes de dépense, la consommation d'eau en bouteille d'un ménage moyen représenterait 43 % de la dépense totale en AEP. On peut avancer que les biens eau en bouteille et eau du robinet sont en fait des substituts très imparfaits et devraient être considérés comme des biens quasiment indépendants, c. a. d. relevant de budgets différents dans l'esprit du consommateur. Si un prix de l'eau courante faible peut déprimer la consommation d'eau en bouteille, la consommation d'eau courante est peu sensible au prix de l'eau en bouteille. Si ce raisonnement est valable au niveau quantitatif il fait l'impasse sur les aspects qualité de l'eau distribuée qui influent certainement sur le comportement des consommateurs. On manque d'études statistiques précises de ce problème d'effet de la qualité de l'eau sur la demande en AEP.

Par ailleurs, la théorie économique suggère que la demande d'un bien dépend non seulement du prix de ses substituts mais aussi de ses compléments. Or si l'eau ne possède guère de substituts, elle est

fréquemment utilisée en complément d'autres biens (biens durables d'équipement entre autres). Le prix de ces compléments intervient surtout sur la demande de moyen long terme. Agthe et Billings (1996) ont étudié les déterminants des choix d'adoption d'équipements plus économes en eau par les consommateurs. Renwick et Archibald (1997) se sont intéressées à l'endogénéité au prix de l'eau des choix techniques dans l'industrie. Ce type d'études requiert des données fines de comportement, données rarement disponibles à moins d'enquêtes spécifiques. Les équipements ne sont pas les seuls biens complémentaires à l'eau, l'énergie aussi. Hansen (1996) a montré qu'au Danemark où une part importante de l'eau consommée est chauffée (70% du volume total à Copenhague), le prix de l'énergie influençait la demande en AEP.

L'estimation d'une fonction de demande d'eau potable est aussi compliquée par la nature du système de tarification en vigueur et les modalités marchandes de fourniture du bien. Les barèmes usuels sont généralement non linéaires, du type binôme (comprenant une partie fixe et une partie variable dépendant du volume consommé) ou multinôme (tarification par tranches de prix croissantes ou dégressives). Par ailleurs la théorie économique considère une fonction de demande comme un élément d'un système plus général intégrant les demandes pour les biens substitués et complémentaires du bien étudié et la contrainte de revenu pesant sur les parts de dépense consacrés aux différents biens. Le système de prix d'équilibre résulte de la confrontation sur les marchés de ce système de demande agrégé et des conditions économiques de l'offre. Or le prix de l'eau ne résulte pas d'une telle confrontation sur un marché, étant donné la position de monopole naturel dont jouit l'opérateur de distribution, qu'il soit public ou privé. Les données disponibles mesurant généralement les consommations au niveau de districts de distribution, le prix de l'eau observé dans ces districts n'est en fait pas exogène au volume consommé mais endogène du fait de l'influence des volumes distribués sur les coûts de distribution et de potabilisation de l'eau.

En général, ce problème d'endogénéité de la variable prix peut être résolu par des techniques de variables instrumentales d'usage courant en estimation de systèmes de demande à équations simultanées. Toutefois ces techniques ne sont pas applicables à des tarifs multinômes. Pour de tels tarifs, le consommateur fait face à des contraintes de budget linéaires par morceaux et la fonction de demande résultant d'une procédure d'optimisation du bien-être sous contrainte de revenu est non différentiable en certains points. Pour résoudre ce problème, Taylor (1975) et Nordin (1976) ont proposé d'introduire une variable dite de différence dans l'estimation. Cette variable correspond à la différence entre ce que paie effectivement le consommateur et ce qu'il aurait payé si sa consommation totale avait été tarifée au prix de la dernière unité consommée (l'unité marginale). La variable de différence mesure théoriquement l'effet revenu résultant de la structure tarifaire, un tarif croissant par tranches ayant le même effet qu'une taxe et un tarif dégressif par tranches le même rôle qu'une subvention. En principe le coefficient associé à cette variable devrait être égal en valeur absolue mais

de signe opposé au coefficient de la variable revenu dans l'équation de demande. La spécification de Taylor-Nordin a été fréquemment utilisée dans la littérature sans faire réellement l'objet d'un examen critique (à l'exception du travail de Schefter et Davis, 1985, sur données simulées).

Burtless et Hausman (1978) et Moffit (1986, 1990) ont été les premiers à proposer des traitements rigoureux de la spécification du comportement d'un consommateur face à des barèmes par tranches. Ils développent une procédure à deux étapes. A la première étape le consommateur choisit sa tranche marginale de tarification, et à la seconde étape il maximise son utilité sous sa contrainte de revenu et du choix de tranche tarifaire effectué à la première étape. Peu d'études utilisent cette spécification. Dans la plupart des cas, soit l'on ne s'intéresse qu'à la tranche de prix où se situent la majorité des consommateurs (ce qui induit un biais de sélection), soit l'on ignore purement et simplement le problème en construisant un indice de prix moyen par division de la facture totale d'eau par le volume consommé (ce qui conduit à des biais de spécification et de simultanéité, la consommation étant expliquée par une variable calculée à partir de cette même consommation). Une exception est l'étude de Hewitt et Hanemann (1995).

On a déjà souligné que du fait de l'endogénéité de la variable prix, les techniques d'estimation par les moindres carrés ordinaires étaient inappropriées. Les techniques de variables instrumentales ne sont pas non plus applicables à l'estimation de modèles de comportement à deux étapes ou lorsque l'on dispose de données de panel (coupes sur plusieurs années). Seules des méthodes de maximum de vraisemblance peuvent être utilisées. Un exemple récent d'application de cette méthode à des données suédoises est l'étude de Höglund (1997). Nous avons développé une méthode d'estimation originale de ce type sur les données alsaciennes et bordelaises dont nous disposons.

Le tableau 1 rassemble l'essentiel des études disponibles de la demande en AEP aujourd'hui. Pour chaque étude on précise le type de données utilisées, la méthode, et l'on donne la valeur estimée de l'élasticité-prix de la demande en eau. Il apparaît que contrairement à ce qui est souvent affirmé, la demande en AEP n'est pas totalement inélastique au prix de l'eau. Par ailleurs, les valeurs mesurées varient considérablement d'une étude à l'autre. Ces variations résultent bien entendu des contextes étudiés mais aussi des méthodes utilisées. On manque d'études sur données simulées permettant d'apprécier les conséquences des spécifications adoptées sur les résultats obtenus. Il est donc très difficile aujourd'hui d'utiliser les mesures disponibles à des fins de comparaison. Un effort important de rigueur et d'harmonisation des procédures d'estimation est donc encore nécessaire si l'on veut pouvoir y parvenir.

Tableau 3. 1. Principales études de la demande en eau pour l'AEP.

Auteurs	Données	Zone d'étude	Méthode économétrique	Valeur de l'élasticité prix
Howe-Linaweaver (1967)	CS	USA	OLS	-0.23
Gibbs (1978)	CS	Miami, Floride (USA)	OLS	-0.51
Foster-Beattie (1979)	CS	USA	OLS	-0.52
Billings (1982)	TS	Tucson, Arizona (USA)	IV	-0.70
Scheffer-David (1985)	CS	Wisconsin (USA)	OLS	-0.12
Chicoine et al. (1986)	CS	Illinois (USA)	Equations simultanées	-0.71
Chicoine-Ramamurthy (1986)	CS-TS	Illinois (USA)	OLS	-0.48
Nieswiadomy-Molina (1989)	CS-TS	Denton, Texas (USA)	IV, 2SLS	-0.86 ¹ à -0.36 ²
Point (1993)	CS	Gironde (France)	OLS	-0.17
Hansen (1996)	TS	Copenhague (Danemark)	OLS	-0.10
Renwick-Archibald (1997)	CS-TS	Santa-Barbara, Californie (USA)	2SLS	-0.33
Höglund (1997)	CS-TS	Suède	Techniques de données de panel	-0.20

Légende

*: CS pour données en coupe, TS pour série temporelle, OLS pour moindres carrés ordinaires, 2SLS pour double moindres carrés, IV pour variables instrumentales.

1: Les consommateurs font face à des tarifs par tranches croissantes

2: Les consommateurs font face à des tarifs dégressifs par tranches.

3. 3. Méthodologie

Les orientations méthodologiques de l'étude résultent d'une lecture critique de la littérature existante et de la nature des données dont nous disposons. Commençons par décrire brièvement celles-ci. Dans le cadre de la convention ERNA-ENGEES-CGE, nous avons pu accéder à des données de consommation résidentielle agrégée et de tarifs pratiqués au niveau des communes ou syndicats de distribution. Ces données concernent 116 communes de la Moselle sur la période 1988-1993. Les barèmes de tarification détaillés permettent de calculer plusieurs mesures de prix de l'eau (prix marginal, prix moyen incluant la partie fixe du tarif). Alors que l'on observe fréquemment des tarifs par tranches pour les gros utilisateurs (industriels), les ménages sont en général, dans l'échantillon, confrontés à un tarif binôme. La tranche inférieure du barème (aux alentours de 25 m³) correspond généralement aux consommations des résidences secondaires et est très éloignée de la consommation habituelle d'un ménage (environ 120 m³). L'échantillon contient également des données techniques sur le réseau communal (longueur, nombre de fuites), autorisant l'estimation de la fonction de prix de l'eau distribuée. Afin d'appréhender l'impact de l'environnement socio-économique de la commune sur la consommation, des données communales INSEE ont été collectées. Ces données mesurent en

particulier le revenu, l'équipement et la composition des foyers, l'âge de l'habitat. Une variable particulièrement intéressante concerne la proportion de foyers équipés d'un compteur d'eau (maisons individuelles). L'influence de cette variable sur la consommation par tête pourra permettre de quantifier les gains attendus d'une politique de mesure généralisée. Enfin, des variables climatiques (précipitations mensuelles) ont été recueillies auprès de Météo-France sur la période 1988-1993. Les variables de l'échantillon sont les suivantes.

Tableau 3.2 : Liste des variables de l'échantillon.

Y	consommation moyenne par abonné (m3) ;
AP	Prix moyen de l'eau distribuée (FF/m3) ;
MP	Prix marginal de l'eau distribuée (FF/m3) ;
DEN	Densité de population (nombre d'habitants par km2) ;
AGE60	Proportion d'habitants de la commune âgés de plus de 65 ans ;
HH	Proportion de foyers composés de moins d'au plus deux membres ;
ACT	Indice d'activité industrielle ;
HOU	Proportion de résidences individuelles dans la commune ;
BATH	Proportion de foyers équipés de baignoires ;
CAR	Proportion de foyers avec au moins un véhicule ;
H49	Proportion d'habitations construites avant 1949 ;
H82	Proportion d'habitations construites après 1982 ;
I	Revenu imposable moyen (FF par foyer imposable) ;
RAIN	Précipitations totales en juin juillet et août ;
TOTRAIN	Précipitations totales de l'année ;
CO	Nombre de connections au réseau d'adduction ;
LEA	Nombre de fuites réparées sur le réseau ;
NET	Taille du réseau (en km).

La demande de consommation en eau des ménages est spécifiée par une relation (en logarithmes) entre la consommation annuelle par abonné sur la commune, le prix de l'eau (marginal et/ou moyen), le revenu moyen sur la commune, et les caractéristiques socio-démographiques des ménages. Afin de dégager l'effet du prix marginal et du prix moyen sur la consommation, l'approche d'Opaluch (1982) est utilisée. Cette approche consiste à décomposer le prix moyen en deux composantes distinctes (prix marginal et différence entre prix marginal et prix moyen), et à tester la significativité du second terme dans la demande en eau. Il est ainsi possible de tester quelle forme du prix (marginal ou moyen) influence réellement la consommation.

D'un point de vue méthodologique, deux aspects importants sont pris en compte. Tout d'abord, la plupart des études antérieures soulignent l'importance du biais d'endogénéité consécutif à l'introduction du prix moyen dans l'équation de consommation. Le prix moyen est en effet obtenu en divisant la dépense en eau des ménages par la quantité consommée, qui est la variable expliquée du modèle. Ensuite, l'utilisation de données de panel conduit à considérer l'existence d'effets individuels propres aux communes représentant la part non expliquée de la consommation. Ces effets individuels

constants dans le temps sont une source très fréquente d'endogénéité dans ces modèles, car souvent corrélés avec certaines variables explicatives. Puisque l'opérateur de distribution est en monopole local, le tarif pratiqué dépend de la consommation moyenne du district et des caractéristiques propres de ce dernier. La dépendance du prix par rapport au volume consommé est donc soumise à des chocs de demande aléatoire. De plus, le prix pratiqué est a priori déterminé lors d'une phase de négociation au cours de laquelle les caractéristiques du district sont prises en compte. Une justification de l'endogénéité décrite plus haut est que la composante de la consommation inconnue de l'économètre (effet individuel de la commune) fait partie de ces caractéristiques.

Ainsi, les deux formes d'endogénéité des prix *a priori* possibles sont : l'influence de la consommation sur le prix via son impact sur le coût marginal de distribution de l'eau potable, et l'influence de certaines caractéristiques du district tant sur la demande que sur les coûts. Par exemple on peut imaginer qu'une forte proportion de logements individuels dans un district de distribution influe non seulement sur la demande mais aussi sur le coût de distribution (étendue du réseau). En conséquence, des méthodes d'estimation appropriées sont nécessaires afin d'identifier et d'estimer sans biais et efficacement les paramètres de la fonction. La démarche économétrique adoptée est d'appliquer trois estimateurs développés respectivement par Hausman et Taylor (1981), Amemiya et MaCurdy (1986), et Breusch, Mizon et Schmidt (1989). Ces estimateurs conçus pour des modèles de panel avec variables explicatives endogènes sont plus efficaces que l'estimateur usuel des effets fixes, tout en permettant l'identification de l'ensemble des paramètres du modèle. Ils reposent sur l'utilisation des conditions d'exogénéité comme des restrictions identifiantes à partir desquelles un critère d'estimateur GMM (Méthode des Moments Généralisés) peut être défini. Dans notre fonction de consommation par exemple, le prix serait traité comme variable endogène et exclu des conditions d'exogénéité. Par contre, les caractéristiques des communes non corrélées avec l'effet individuel peuvent être utilisées comme instruments, ainsi que toute autre variable exogène du modèle.

3. 4. Premiers résultats

L'objectif de l'estimation économétrique de l'équation de consommation en eau des ménages est de répondre aux questions suivantes :

- a) Les prix moyen et marginal sont-ils vraiment endogènes dans un modèle à données de panel ?
- b) Existe-t-il des effets individuels propres aux communes et corrélés avec des caractéristiques communales ?
- c) Les consommateurs sont-ils sensibles au prix marginal ou au prix moyen ? L'environnement

socio-économique et les conditions climatiques ont-elles un impact sur la consommation en eau ?

d) Les compteurs individuels conduisent-ils à une réduction de la consommation par tête ?

Les résultats d'estimation obtenus avec trois méthodes (MCO (Moindres Carrés Ordinaires), Effets Fixes, BMS (Breusch-Mizon et Schmidt) figurent dans le tableau suivant. Les MCO fournissent des estimations convergentes sous l'hypothèse d'absence d'effets individuels. Les Effets Fixes ne permettent d'estimer que les paramètres associés aux variables explicatives variant dans le temps. L'estimateur GLS (Moindres Carrés Généralisés) repose sur l'hypothèse du caractère aléatoire des effets individuels. Elle fournit par conséquent des estimations biaisées si certaines variables explicatives sont corrélées aux effets individuels. Enfin, des méthodes par Variable Instrumentale, seule celle de Breusch-Mizon-Schmidt est retenue, dans la mesure où elle est la plus efficace.

Les résultats d'estimation peuvent être résumés comme suit. Le test d'Opaluch appliqué à nos estimations conduit à ne rejeter ni la spécification en prix marginal, ni celle en prix moyen. Les consommateurs seraient donc sensibles à une combinaison des deux prix, avec une élasticité de la demande par rapport au prix moyen d'environ -22%. Ce résultat est proche de celui obtenu par Point (1993) dans le cas de la Gironde (-17%). Le revenu imposable moyen a un effet positif et significatif, l'élasticité de la demande par rapport au revenu étant d'environ 10%. Il est intéressant de noter que les communes dans lesquelles les logements sont plus récents consomment proportionnellement moins d'eau, probablement en raison du nombre inférieur de fuites. Les résultats montrent aussi l'influence positive sur la consommation de la possession d'une baignoire ou d'un véhicule. En ce qui concerne les communes dans lesquelles la proportion de maisons individuelles, équipées d'un compteur, est relativement plus importante, on observe dans ce cas une consommation par tête plus faible, indiquant bien l'existence d'un « effet compteur » d'environ -44%. Ce résultat va dans le sens de politiques récentes de la part d'opérateurs privés, et visant à une généralisation des appareils de mesure pour les abonnés.

Enfin, les conditions climatiques ne semblent pas affecter la consommation par abonné ; dans la région considérée, où les précipitations sont relativement abondantes, le recours à l'arrosage est limité.

Les résultats de l'estimation sont résumés dans le tableau suivant :

Tableau 3.3. Modèle avec prix décomposé

	MCO	Effets Fixes	GLS	BMS
Constante	-4.883(**) (-4.666)	...	-0.481 (-1.465)	-0.458 (-1.394)
MP	-0.158(**) (-7.653)	-0.019 (-0.818)	-0.086(**) (-4.838)	-0.072(**) (-3.550)
AP-MP	-0.172(**) (-12.067)	-0.265(**) (-11.350)	-0.210(**) (-13.082)	-0.216(**) (-10.796)
I	0.472(**) (8.803)	0.024 (0.574)	0.123(**) (3.333)	0.109(**) (2.885)
RAIN	0.024 (0.892)	-0.007 (-0.755)	-0.010 (-1.038)	-0.008 (-0.907)
DEN	-0.000 (-0.892)	...	-2.4e-005 (-0.148)	-1.6e-005 (-0.099)
AGE60	-0.102(*) (-2.388)	...	-0.169(*) (-2.543)	-0.171(**) (-2.577)
HH	0.043 (0.686)	...	0.160 (1.660)	0.164 (1.696)
ACT	0.833(**) (3.787)	...	1.039(**) (2.999)	1.051(**) (3.031)
HOUSE	-0.239(**) (-8.105)	...	-0.207(**) (-4.504)	-0.203(**) (-4.364)
BATH	0.099 (1.492)	...	0.072 (0.697)	0.060 (0.585)
CAR	0.394(*) (2.571)	...	0.464(*) (1.928)	0.462 (1.916)
H49	0.060(**) (4.115)	...	0.057(**) (2.596)	0.058(**) (2.614)
H82	-0.170(**) (-11.220)	...	-0.176(**) (-7.468)	-0.178(**) (-7.459)

Notes: Les t de Student sont entre parenthèses ; (*) : paramètre significatif à 5% ; (**) : paramètre significatif à 1% ; ... : paramètre non identifiable par cette méthode d'estimation.

3.5. Conclusion

Une méthodologie analogue a été utilisée pour estimer une fonction de demande en eau potable dans le département de la Gironde. Les valeurs estimées des élasticités prix sont relativement comparables en Moselle et en Gironde, un peu moins élevées dans ce dernier département. De plus les variables climatiques sont significatives en Gironde, alors qu'elles ne le sont pas en Moselle, un résultat conforme à l'intuition. Les deux zones étudiées se distinguent par les revenus de leurs habitants, l'effet du climat, le niveau et l'évolution récente du prix de l'eau, et leurs caractéristiques résidentielles. Nous comptons prolonger le travail en cours par une comparaison approfondie des résultats. L'objectif est de disposer d'une méthodologie adaptée et d'une compréhension suffisante des déterminants de la demande pour envisager à terme des études de la demande en AEP au niveau national.

4. IRRIGATION ET POLLUTIONS DIFFUSES.

Dans leur état actuel d'avancement, les recherches sur les déterminants de la demande agricole en eau et la régulation des pollutions diffuses d'origine agricole sont encore relativement indépendantes. Nous les présentons successivement dans les deux sous-sections suivantes.

4. 1. Demande agricole en eau.

4. 1. 1. Questions étudiées et contexte socio-économique

L'objectif est d'aboutir à une bonne compréhension des déterminants de la demande en eau des agriculteurs à usage d'irrigation. L'irrigation représente 40 % de la consommation d'eau (prélèvements non restitués au milieu) en France. Cette consommation est fortement concentrée en été (jusqu'à 90 % des volumes consommés en période d'étiage dans un bassin comme Adour-Garonne), et fluctue fortement d'une année sur l'autre selon le contexte climatique. L'irrigation a connu un très fort développement en France au cours des vingt dernières années, les superficies irriguées étant multipliées par cinq durant cette période. Ce développement a été largement encouragé par les pouvoirs publics, que ce soit au niveau local ou national, car conçu comme un moyen de garantir la compétitivité de l'agriculture française dans un contexte d'évolution rapide de la politique agricole européenne. Mais c'est la situation créée par la réforme de la PAC en 1992 qui a le plus contribué à accélérer le phénomène, en particulier par l'instauration de différentiels de primes entre surface irriguées et non irriguées. On a alors assisté au développement d'une irrigation de complément dans des régions où la pluviométrie paraissait suffisante, du moins en année moyenne, à côté d'une irrigation plus traditionnelle, destinée à compenser des déficits hydriques chroniques, caractéristique du sud de la France.

L'évolution des pratiques d'irrigation dans la région de la Beauce est à cet égard exemplaire. Les superficies effectivement irriguées (au moins une fois par an) dans la région centre sont passées de 66 000 ha à 352 000 ha entre 1975 et 1996 soit une multiplication par cinq en vingt ans. Durant le même temps les superficies irrigables passaient de 150 000 ha à 453 000 ha, le ratio d'utilisation des périmètres irrigables augmentant fortement puisqu'il progresse de 0,44 à 0,77 au cours de la période. Cette explosion des pratiques d'irrigation résulte de la combinaison de plusieurs facteurs :

- a) L'évolution des techniques tout d'abord, et en premier lieu la généralisation des asperseurs, plus économes en main d'œuvre.

- b) Des épisodes de sécheresse qui ont poussé les agriculteurs à sécuriser leurs rendements par un recours accru à l'irrigation.
- c) La pression des industriels transformateurs par le biais de contrats de livraison ouverts aux seuls irriguants.
- d) Les conséquences en termes de primes de la réforme de 1992.

Cette montée en puissance de l'irrigation a contribué à l'intensification des conflits d'usage pour l'accès à la ressource en eau dans de nombreuses régions. Or si la plupart des usages de la ressource sont soumis à tarification, l'usage agricole ne l'est quasiment pas, sauf pour les adhérents de systèmes d'irrigation collectifs ou pour les exploitants liés par des contrats de fourniture avec des compagnies d'aménagement comme Bas-Rhône Languedoc ou la Compagnie des Côteaux de Gascogne. Les modalités d'accès des agriculteurs à la ressource sont largement de type réglementaires, l'administration concédant pour des durées limitées des droits de tirage sur les eaux superficielles ou sur les nappes. Par ailleurs, à la différence des autres usagers, les agriculteurs ne paient pas de redevance prélèvement aux Agences de l'Eau, bien qu'ils y soient théoriquement assujettis depuis la loi sur l'eau de 1964. Cette situation est en train de changer, puisque les Agences de l'Eau ont entamé, et parfois conclu, des négociations avec la profession agricole visant à généraliser le comptage et le principe de perception d'une redevance.

La mise en place d'une tarification de l'eau à usage agricole requiert une analyse préalable de ses déterminants. Cette analyse est difficile à la fois au plan théorique et appliqué. La demande agricole en eau présente les caractéristiques d'une demande de pointe en univers aléatoire. L'appréciation des conséquences d'un système de tarifs (ou de tout système d'allocation de droits d'accès à la ressource) doit donc s'appuyer sur une modélisation fine du comportement d'un agriculteur irriguant au cours d'une campagne et sur plusieurs campagnes. Dans le premier cas, l'accent est mis sur les déterminants de très court terme de la demande, l'intérêt étant de pouvoir évaluer l'efficacité de dispositifs d'allocation (prix ou quotas) en situation de crise en période d'étiage par exemple. Dans le second cas, l'étude des déterminants à moyen long terme de la demande permet d'analyser voire d'orienter les décisions d'équipement et d'investissement des exploitants en matière d'irrigation (ces équipements sont fréquemment subventionnés par les collectivités locales).

La recherche en cours porte essentiellement sur les déterminants de très court terme de la demande en eau des agriculteurs. Pour étudier ces déterminants, on s'est appuyé sur un modèle couplant un modèle de décision micro-économique à un modèle agronomique de conduite de culture, modèle qui sera détaillé par la suite.

Au plan appliqué, l'estimation statistique d'une fonction de demande agricole en eau requiert *a minima* des données de prix et de quantités consommées par les irriguants. Or, nous avons vu que l'eau à usage agricole est quasiment gratuite. Par ailleurs jusqu'à très récemment, les volumes prélevés n'étaient pas comptabilisés. Une démarche économétrique classique d'estimation de la demande ne peut donc pas être appliquée. C'est pour cette raison que nous avons été conduits à emprunter une voie indirecte (et moins commode), voie basée sur une modélisation de la technologie agricole et des déterminants agronomiques de la contribution de l'irrigation aux rendements des cultures.

4. 1. 2. Contexte scientifique

La littérature en économie agricole aborde la question de deux manières. Certaines analyses s'appuient sur la construction ou l'estimation d'une fonction de production agricole incluant l'irrigation. On peut appeler primale cette approche qui tente de prédire le comportement de l'exploitant agricole à partir d'une représentation statistique, voire mathématique, de sa technologie. Elle a ses avantages mais aussi ses inconvénients. Son principal intérêt est de contourner le problème de l'absence de données de prix et de consommation d'eau en simulant, à l'aide d'un modèle agronomique plus ou moins élaboré, les besoins en eau des cultures pour différents niveaux de rendements, qui eux sont en général observables. Un autre de ses avantages est de pouvoir décrire en principe de manière très fine la technologie de l'exploitation. Si l'on suppose un comportement optimisateur de la part de l'agriculteur, on peut identifier le coût d'opportunité d'accès à la ressource de l'exploitant. Ce coût correspond à la disposition maximale à payer de l'irriguant pour l'eau qu'il consomme. Un balayage par simulation de différentes quantités d'eau utilisables permet de reconstituer une fonction de demande en eau des agriculteurs.

Les principaux inconvénients de cette approche sont les suivants. Postulant un comportement optimisateur de l'exploitant, elle ne prend pas en compte les nombreuses inefficacités techniques ou allocatives qui caractérisent le contexte de la production agricole. La pertinence des fonctions de demande construites selon la méthodologie exposée précédemment repose sur l'idée que l'agriculteur se positionne sur l'enveloppe supérieure de son ensemble de production. Si cette hypothèse n'est pas vérifiée, les demandes simulées sont biaisées. Pour contourner ce problème, on peut envisager de désagréger davantage la technologie. Une prise en compte fine des contraintes pesant sur l'exploitation permet d'interpréter des inefficacités constatées à des niveaux d'agrégation plus élevés, comme résultant d'une prise en compte optimale de ces contraintes par l'exploitant. Les inefficacités disparaissent donc en tant que telles et la description de la technologie se rapproche d'une frontière théorique d'efficacité, frontière définie dans un modèle qui tiendrait compte de toutes les contraintes de l'exploitant. Outre la complexité mathématique de telles approches, elles s'avèrent très exigeantes

en données. En effet, elles impliquent de mobiliser des données climatiques, agronomiques, pédologiques et technico-économiques, données issues de sources généralement distinctes et de qualité inégales.

Une autre approche possible est de construire par des méthodes économétriques une fonction de coût de production en agriculture. Cette approche peut être qualifiée de duale dans la mesure où elle s'intéresse directement à la mesure des valeurs sans passer par une représentation des liens techniques entre les facteurs de production mobilisés et les rendements obtenus. Le coût de l'eau étant quasi nul pour l'agriculteur, on est conduit à l'estimation de fonctions de coût restreintes, paramétrées par l'eau consommée. Un argument d'optimisation analogue à l'approche précédente permet de construire une fonction de demande en eau potentielle sur la base des dispositions maximales à payer de l'irriguant pour différents niveaux d'approvisionnement. Cette approche a l'avantage de partir d'une vision d'ensemble de l'économie de l'exploitation. En particulier, elle permet un traitement satisfaisant des problèmes posés par la multiproduction caractéristique de l'agriculture. De plus, elle est susceptible de s'appliquer tant à l'évaluation des coûts de production de court terme qu'à ceux de long terme, ce qui n'est pas le cas des approches primales, essentiellement statiques et donc incapables de prédire correctement les conséquences des évolutions technologiques sur les revenus et le comportement des exploitants. Ce type d'étude, classique en économie de la production agricole, est très développé aux Etats-Unis. On en trouvera des exemples à la sous-section 4. 2. 2. du rapport.

Les deux approches souffrent également de limites communes. Les premières résultent des difficultés de traiter correctement le multiproduction en agriculture. De nombreuses recherches se sont portées sur le choix d'une spécification pertinente de la fonction de coût dans ce cas. La possibilité de jointure entre les activités de l'exploitation pose des problèmes d'identification du modèle d'estimation des coûts. Par ailleurs ces approches prennent difficilement en compte le caractère aléatoire et donc risqué de l'activité agricole (cf. section 4. 2. 2.). Les principales difficultés rencontrées sont les suivantes :

- a) L'estimation correcte des distributions de probabilité associées aux aléas de production ou aux risques de prix ;
- b) L'estimation des paramètres d'attitude des exploitants agricoles vis à vis du risque ;
- c) La définition de règles de calcul économique pertinentes pour un agriculteur opérant en situation risquée, mais pouvant avoir recours à des systèmes d'assurance.

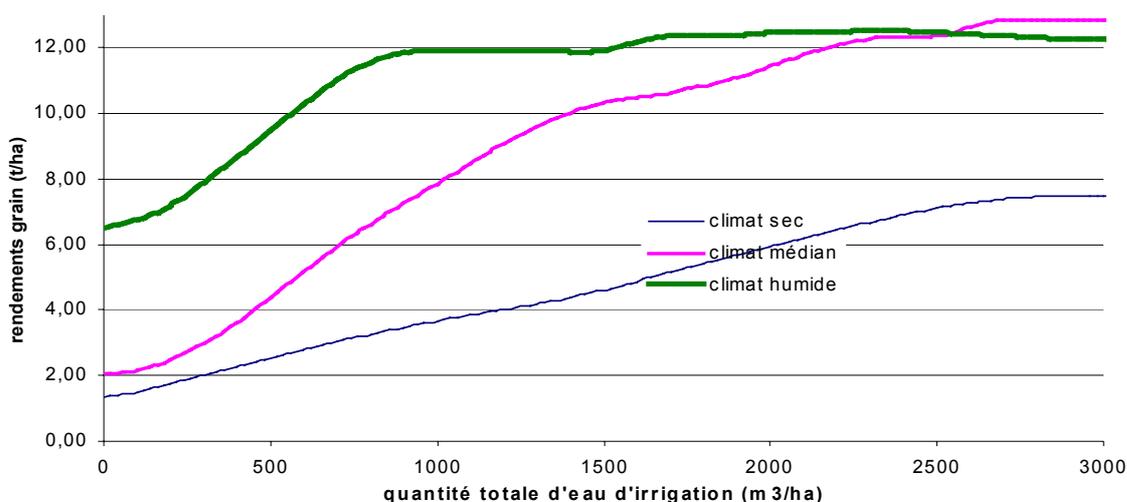
4. 1. 3. Méthodologie

L'étude de l'irrigation dans la Beauce se base sur l'utilisation du logiciel EPIC¹ développé initialement par le Département Américain à l'Agriculture pour prédire les relations entre l'érosion du sol et la productivité agricole, couplé à un module économique d'analyse des déterminants de la demande agricole en eau (Sharpley et Williams, 1990).

EPIC simule la croissance des cultures étudiée en fonction des stocks d'eau et des éléments minéraux du sol à partir des données sur :

- a) le climat (radiation, pluviométrie, températures minimales et maximales, humidité relative, vent),
- b) le sol (texture, profondeur, humidités à la capacité au champ et au point de flétrissement, matières organiques, azote minéral),
- c) la plante (caractéristiques propres à chaque espèce ou génotype),
- d) et les itinéraires techniques (dates de semis et de récolte, fertilisation, chaulage, emplois de pesticides et d'herbicides, irrigation).

Graphique n°4.1 : Fonctions de réponse à l'eau du maïs avec trois scénarii climatiques pour une répartition uniforme de la quantité d'irrigation entre 5 tours d'eau.



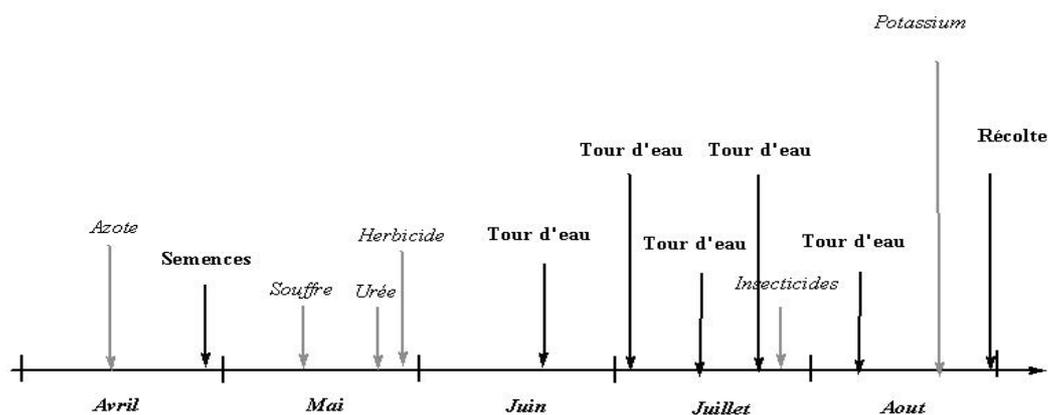
¹ Erosion/Productivity Impact Calculator

EPIC comprend différents modules de modélisation dont la structure unique permet un fonctionnement pluri-espèces et pluri-annuel à pas de temps journalier. Il estime d'après la radiation solaire et l'indice foliaire la quantité d'énergie lumineuse interceptée et sa transformation en biomasse. Ainsi, nous obtenons le rendement en grain de la culture en fonction du climat, des itinéraires techniques et des quantités d'eau d'irrigation. Ces résultats peuvent être en données journalières, mensuelles, annuelles ou globales. Pour simplifier l'obtention des fonctions de réponses à l'eau à partir des simulations du logiciel EPIC, nous avons programmé un logiciel *-EPIC-Irri-* avec une interface graphique.

Pour chaque simulation, les calculs de la croissance des cultures sont réalisés pour une année donnée. Le climat associé à cette année correspond aux relevés journaliers observés par Météo France dans la Beauce (Météo France , 1990). Les itinéraires techniques types ont été déterminés avec l'aide des conseillers agricoles des chambres d'agriculture (Acary, 1997) (cf. graphique n° 4. 2).

Les simulations réalisées avec EPIC-Irri permettent l'étude de la sensibilité d'un facteur sur les rendements, toutes choses égales par ailleurs. Nous pouvons analyser l'effet du climat, des types de répartitions des tours d'eau, des dates d'irrigation, de fertilisation, de semis, de récolte, ...

Graphique n°4.2 : Itinéraires techniques pour la culture du maïs



Ces études de sensibilité permettent d'optimiser les itinéraires techniques de l'exploitation dans un but de minimisation des quantités d'eau apportées pour un rendement donné ou bien son dual : maximiser

le rendement cultural pour une quantité d'eau donnée.

La fonction de réponse à l'eau d'une culture donnée correspond à la fonction de production de l'agriculteur, avec comme facteur variable : l'eau d'irrigation. Tous les autres facteurs (fertilisation, sol, climat, ...) sont considérés comme fixes. Les facteurs de production sont donc supposés non complémentaires et non substituables. Cette hypothèse simplificatrice ne représente pas la réalité, mais permet d'analyser la sensibilité des rendements à l'eau d'irrigation.

Le profit restreint par hectare de la culture du maïs est donc :

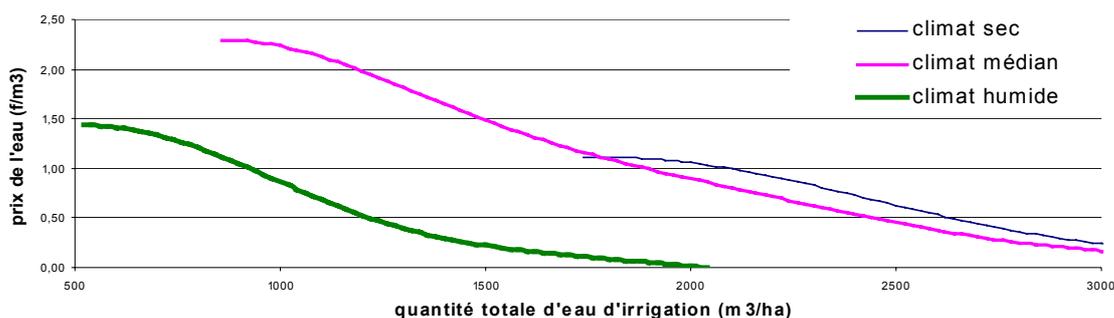
$$\Pi = p \cdot y(e) - CV \cdot e - CF$$

avec p le prix d'achat de la tonne de maïs suivant les années, $y(e)$ la fonction de production : la fonction de réponse à l'eau, e la quantité d'eau, CV les coûts variables : les coûts énergétiques de pompage, et CF les coûts fixes : les achats d'intrants fixes,

4. 1. 4. Premiers résultats :

Avec les fonctions de réponse à l'eau du maïs pour la répartition de l'eau d'irrigation conseillée par les groupements de développement agricole, nous obtenons des fonctions de demande potentielles dans les trois scénarii climatiques envisagés (graphique n° 4. 3):

Graphique n°4.3 : Fonctions inverses de demandes en eau à usages agricoles pour la culture du maïs avec la quantité d'eau répartie en 5 tours uniformes



Les profils des courbes de profit sont semblables à ceux des fonctions de réponse à l'eau, la partie variable des coûts étant relativement faible. Les profits du climat médian dépassent ceux du climat humide pour des valeurs supérieures à 1900 m³/ha. C'est encore la conséquence de l'effet des deux facteurs partiellement substituables eau et radiations solaires sur la croissance de la plante.

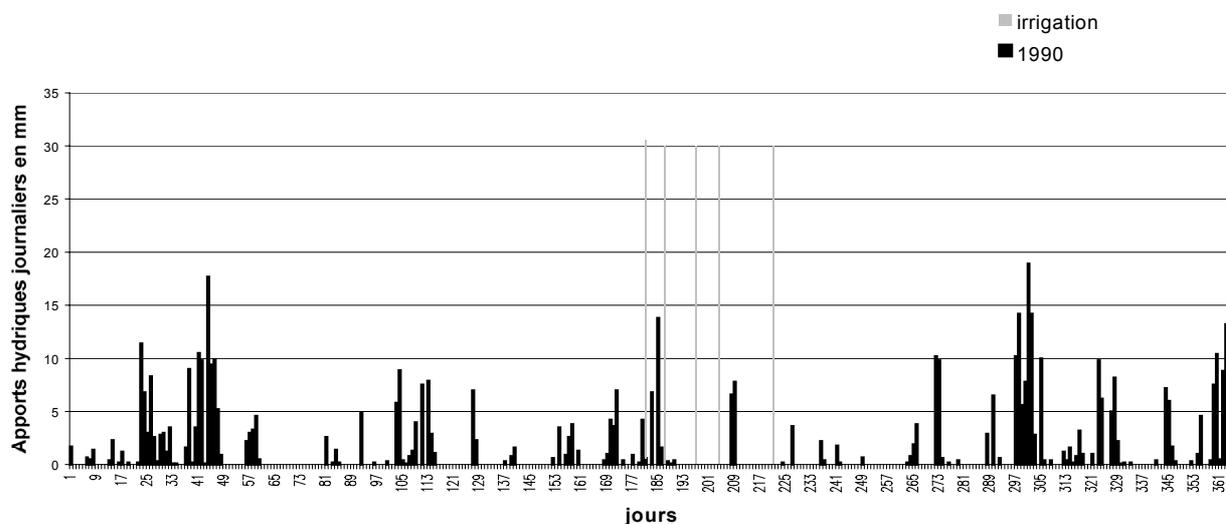
Ainsi, avec les fonctions de réponse à l'eau et les profits, nous pouvons étudier l'impact d'une contrainte du volume d'irrigation sur le revenu des exploitants en considérant le volume recommandé.

Comme les volumes qui maximisent le profit sont supérieurs aux volumes recommandés par les agronomes, et que les gains en rendement ont tendance à diminuer pour une unité d'eau supplémentaire pour les climats médian et sec (le profit marginal est décroissant), alors un rationnement imposé au niveau qui maximise le profit aura généralement un effet plus faible que le même rationnement au point recommandé par les agronomes pour ces climats. C'est effectivement le cas pour l'ensemble des rationnements étudiés avec les climats sec et humide.

Lorsque des rationnements en eau sont introduits, le coût d'accès à l'eau devient différent du profit marginal, $\partial\Pi/\partial e$. En effet, l'agriculteur serait certainement disposé à payer plus que le coût d'accès pour obtenir plus d'eau d'irrigation. Le prix maximum par unité d'eau qu'il serait prêt à payer est appelé *le coût d'opportunité d'accès à l'eau*. Une application directe du théorème de l'enveloppe permet de montrer que pour un quota d'eau de niveau E , ce coût d'opportunité est juste égal à $\partial\Pi/\partial e$ évalué en $e = E$. Par une méthode non paramétrique appliquée aux profits simulés à partir des fonctions de réponse, on a estimé la dérivée de la fonction de la fonction de profit. Ce sont ces dérivées calculées, correspondant aux dispositions maximales à payer des irriguants, qui sont représentées sur le graphique 4.3.

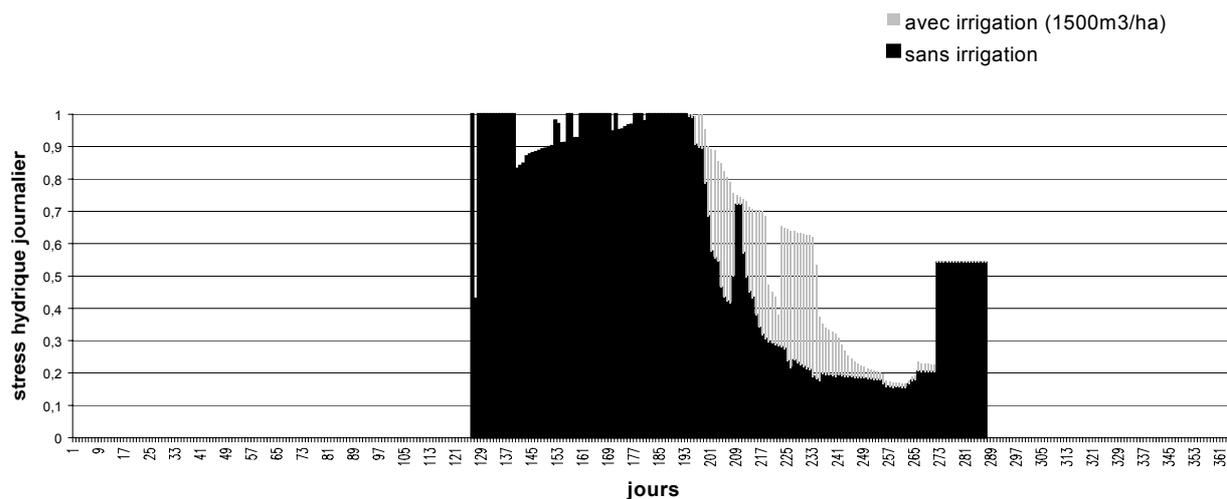
Les fonctions de réponse à l'eau sont cependant obtenues sous de nombreuses hypothèses simplificatrices. Notamment, les rendements grain ne sont représentés qu'en fonction des quantités apportées d'eau d'irrigation.

Graphique n°4.4 : Apports hydriques journaliers en année sèche

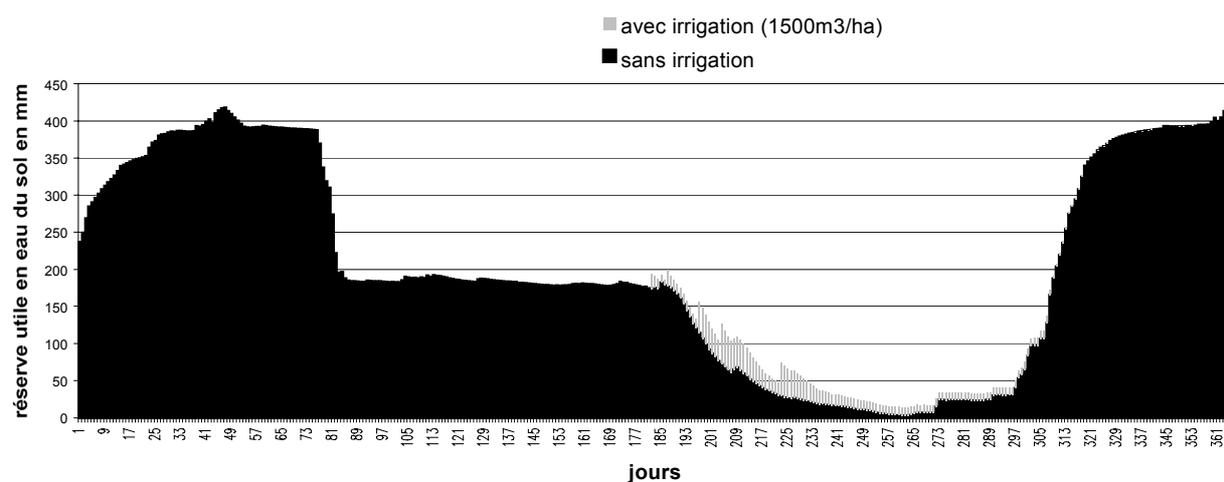


Or, les dates des tours d'eau et les répartitions associées ont également des rôles très importants sur ces rendements. Nous avons donc étudié l'impact des répartitions des tours d'eau sur les rendements en examinant les caractéristiques de la plante durant la période de croissance (graphiques 4. 4., 4. 5. a-b et 4. 6.).

Graphique n°4. 5. a : Comparaison du stress hydrique journalier avec/sans irrigation en année sèche

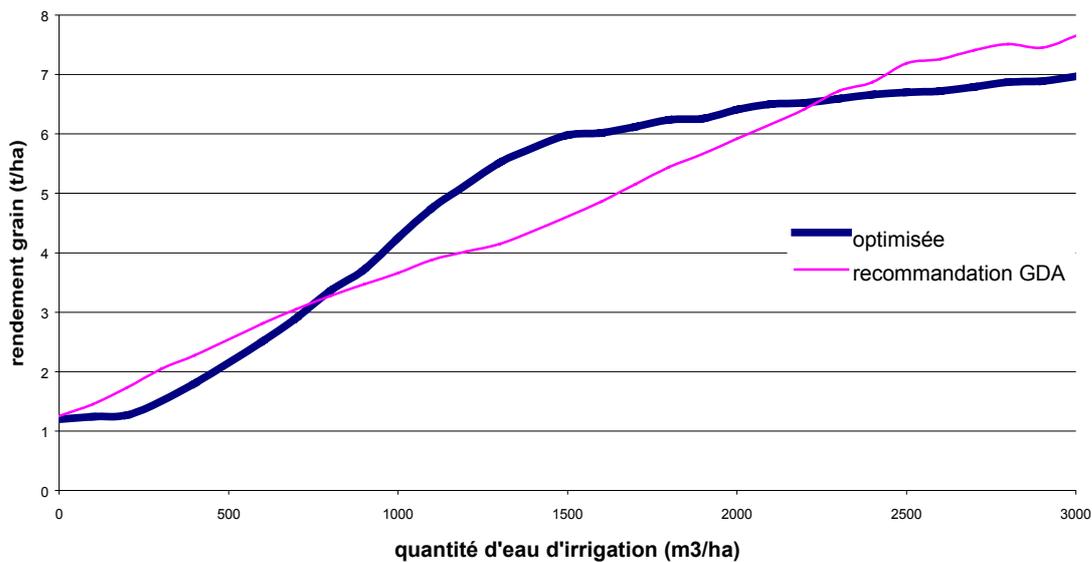


Graphique n°4. 5. b : Comparaison de la réserve utile du sol avec/sans irrigation en année sèche



En considérant les apports hydriques journaliers, les variations de la réserve utile en eau du sol et le stress hydrique de la culture, nous avons pu effectivement déterminer des tours d'eau qui augmentent les rendements grain du maïs entre 800 et 2300 m³/ha. Ainsi, en optimisant les opérations culturales d'irrigation, c'est à dire en modifiant les dates et quantités d'irrigation, nous pouvons augmenter les rendements pour une même quantité d'eau. Les fonctions de réponse à l'eau ainsi obtenues avec un calendrier ajusté sont représentés pour une année sèche dans le graphique 4.6 :

Graphique n° 4.6 : Fonctions de réponse à l'eau du maïs avec les itinéraires techniques recommandés/optimisés



Une procédure d'optimisation plus précise, basée sur l'étude jointe du calendrier cultural et des répartitions des quantités d'eau d'irrigation permettrait, en utilisant, le modèle EPIC pour calculer l'impact des apports hydriques sur la croissance de la biomasse aérienne, de réaliser un modèle prévisionnel en fonction des apports pluviométriques maximisant les rendements en grain des cultures.

4. 1. 5. Conclusion

L'étude relève d'une approche primale telle que définie dans la sous-section précédente. A partir d'une représentation mathématique des déterminants de la formation du rendement des cultures, on induit une fonction de valeur de l'eau à usage d'irrigation en grande culture. La limite principale de ce travail réside dans le caractère trop frustré de sa prise en compte de l'activité économique de l'exploitation et donc du comportement de l'exploitant agricole. Nous développons actuellement un modèle économétrique d'estimation d'une fonction de coût en grandes cultures dans la Beauce. L'introduction

de ce modèle dans l'outil de simulation présenté devrait permettre d'en améliorer grandement la pertinence et la fiabilité en termes de prédiction du comportement d'un irriguant confronté à différents schémas de régulation publique de l'accès à la ressource.

4. 2. Régulation des pollutions diffuses d'origine agricole

4. 2. 1. Questions étudiées et contexte socio-économique

L'intérêt pour l'étude des phénomènes de pollution agricole résulte d'une prise de conscience progressive de la gravité de ces pollutions, de leurs évolutions inquiétantes et des difficultés rencontrées par les pouvoirs publics pour les limiter à la source. Ces difficultés résultent en grande partie du caractère indirect et diffus de ces pollutions. Elles sont indirectes dans le sens où il n'existe pas en général de relation simple entre des émissions potentiellement polluantes et leurs conséquences sur la qualité des eaux des aquifères ou des cours d'eau. Elles sont diffuses du fait de la multiplicité des émetteurs de pollution, dont chacun peut avoir une contribution marginale, voire nulle, à la pollution ambiante.

Les systèmes de taxation individuels classiques sont généralement inefficaces ou impraticables dans de tels contextes. L'analyse économique s'est donc intéressée aux performances de systèmes de gestion partagée des effluents au sein d'un collectif. Ceci a conduit les économistes à préconiser des systèmes de régulation basés sur la délégation à ce collectif d'un objectif global de pollution, délégation assortie d'un système de pénalités et de subventions. Toutefois, de tels systèmes n'ont pas été effectivement mis en œuvre jusqu'à présent. Les régulations utilisées s'inscrivent dans des logiques classiques de taxation (engrais ou phytosanitaires), de subventions à la prévention des pollutions (en particulier dans les activités d'élevage), voire de quotas d'utilisation des facteurs polluants ou de normes d'application.

Comprendre les raisons des réticences des pouvoirs publics à s'engager dans des systèmes de régulation collectifs des pollutions diffuses dépasse le cadre de notre étude. On peut néanmoins dégager quelques pistes de réflexion. Contraindre les exploitants agricoles à respecter des objectifs globaux de maîtrise de leurs pollutions peut conduire à imposer des pénalités individuelles très élevées en cas de dépassement de cet objectif. Du fait du caractère indirect et bien souvent aléatoire des phénomènes de pollution, les objectifs fixés peuvent ne pas être atteints, même si les agriculteurs réalisent un effort *a priori* suffisant de maîtrise de leurs pollutions. L'importance des risques encourus par les agriculteurs peut rendre le système inacceptable. Une solution à ce problème est de mettre à

profit les possibilités de coopération des agriculteurs entre eux pour atteindre un objectif négocié de réduction de leurs pollutions. Nous avons engagé une réflexion analytique sur cette question dans un cadre formalisé. Une des conclusions de l'analyse est que la coopération est susceptible de réduire considérablement le niveau des pénalités efficaces à imposer aux exploitants et donc renforcer l'acceptabilité de tels systèmes.

D'autre part, la mise en œuvre de politiques plus classiques, comme la taxation des engrais par exemple, requiert une analyse approfondie des déterminants de la demande de fertilisant par l'exploitant agricole. On manque d'études empiriques sur ce thème en France et l'objectif du travail en cours est de contribuer à combler ce manque.

4. 2. 2. Contexte scientifique

Si les propositions des économistes visant à limiter la pollution diffuse d'origine agricole sont bien répertoriées (schémas de taxation-subvention basés sur la pollution ambiante, taxation ou quotas des intrants, limitation des surfaces), la quantification de leur impact réel sur la réduction des pollutions est difficile. Plusieurs raisons à cela : les programmes s'appuyant sur de telles recommandations sont peu nombreux, les données de pollution sont très rares et hétérogènes, et surtout il est nécessaire d'incorporer une modélisation du devenir des polluants faisant appel à la science du sol et l'agronomie.

En conséquence, deux axes ont surtout été développés :

- a) l'évaluation des politiques de régulation « indirecte » (taxation ou quotas sur les engrais azotés) ;
- b) l'impact de l'activité agricole sur la qualité du milieu (eaux souterraines).

Le premier axe repose fondamentalement sur une analyse préalable du comportement de production et d'utilisation d'intrants potentiellement polluants par les exploitants. Il est bien connu à présent qu'une politique efficace de contrôle des pollutions diffuses par des instruments traditionnels (« *Market-based instruments* », taxes et quotas) doit intégrer les pratiques culturelles des agriculteurs, afin de mieux moduler les niveaux des instruments à chaque cas particulier. Ceci est conforme à l'idée selon laquelle une politique intégrant l'hétérogénéité des exploitations, tant pour ce qui est des modes de production que de la nature du milieu, est préférable à une politique uniforme (Leathers et Quiggin 1991, Antle et Just 1990).

Les comportements dans l'utilisation des intrants polluants (engrais, pesticides) ont été d'abord modélisés par le biais de systèmes de demande par culture, ou, plus récemment, au niveau de

l'exploitation (Huffman 1989, Orazem et Miranowski 1994). L'approche en mono-production est cependant réductrice et conduit à des résultats inexacts si les productions sont jointes. Tel est le cas lorsque la décision relative à la surface consacrée à une culture dépend des prix d'output des autres cultures (Babcock et al., 1987). Une analyse multi-produits réaliste devrait également modéliser les schémas de rotation culturale, qui jouent un rôle fondamental dans l'impact des polluants sur le milieu (Kennedy 1986). Une modélisation exhaustive intégrant les décisions d'allocation des surfaces cultivables ainsi que les combinaisons de facteurs de production pour toutes les cultures, pourrait ainsi prédire les modifications attendues suite à une politique de régulation indirecte. Une approche très utilisée pour traiter le cas multi-produits a consisté à analyser la forme duale du problème du producteur, c'est-à-dire le programme de minimisation de ses coûts sous une contrainte technologique donnée (Chambers et Just, 1989, Shumway, 1983). De très nombreux travaux empiriques ont utilisé l'approche duale, qui permet en outre de calculer aisément, via l'utilisation d'une forme fonctionnelle flexible, les diverses caractéristiques de la technologie de production (élasticités de substitution, rendements d'échelle).

Ensuite, le comportement des agriculteurs face au risque a été avancé comme un argument majeur dans l'éventuelle sur-utilisation de produits polluants (Babcock et Hennessy 1996, Babcock 1992, Lambert 1990). En fonction de l'impact des divers intrants sur le risque de production (positif pour les nitrates, négatif pour les pesticides), l'exploitant modifiera sa combinaison d'intrants afin de limiter son risque (Horowitz et Lichtenberg, 1993, Chambers et Lichtenberg, 1994). De nombreux travaux ont été réalisés concernant l'influence du risque sur les résultats attendus de politiques de taxation et de quotas (Babcock 1990). La plupart des travaux dans la littérature s'appuient sur des fonctions d'utilité du profit des exploitants simples à utiliser dans la modélisation, mais peu réalistes. En particulier, les fonctions d'utilité quadratiques ou à Aversion Absolue pour le Risque Constante (CARA) permettent des solutions explicites simples dans les problèmes de maximisation du profit de la part des producteurs, mais elles ne correspondent pas aux résultats empiriques (Binswanger 1981). En conséquence, des fonctions appropriées comme les fonctions DARA (Aversion Absolue pour le Risque Décroissante) devraient être employées. Concernant l'analyse économétrique du risque en agriculture, des approches paramétriques (Antle 1987, Just et Pope 1991, Saha et al. 1994) ont été proposées pour estimer l'attitude des producteurs vis-à-vis du risque. Une analyse structurelle satisfaisante avec des fonctions d'utilité pertinentes (DARA) est beaucoup plus difficile, en raison de l'inexistence de solutions analytiques dans la majorité des cas. Les solutions d'équilibre du problème du producteur apparaissent en effet sous la forme d'une équation implicite non linéaire et en espérance. Les approches combinant les aspects multi-production et aversion au risque sont pratiquement inexistantes dans la littérature, en tout cas avec telles fonctions d'utilité. La raison est là encore la forte complexité du système à résoudre. En définitive, un cadre formel d'analyse du comportement des producteurs prenant en compte les attitudes face au risque et le caractère multi-

produits de l'activité agricole est un objectif ambitieux, mais néanmoins nécessaire si l'on souhaite quantifier de façon réaliste les conséquences d'une politique agro-environnementale.

Une fois modélisé le comportement de production des agriculteurs au regard de l'utilisation de facteurs de production polluants, il reste à estimer quantitativement l'impact de l'activité agricole sur le milieu. En raison du peu de données précises sur les pollutions des eaux en Europe, la plupart des études ont porté jusqu'ici sur les Etats-Unis. Deux aspects essentiels à étudier sont :

a) le niveau de pollution engendré par l'activité agricole ;

b) le transfert des polluants vers les aquifères.

Ces deux aspects font appel à une modélisation agronomique, pédologique et hydrologique. A partir des données de production et d'utilisation d'intrants polluants, les résidus azotés (non utilisés par les cultures) sont calculés en se basant sur le rendement de la culture, le mode d'épandage, les conditions climatiques, le type de sol (modèle EPIC). Si le couplage d'un modèle de production économique avec sa contrepartie agronomique ne pose pas de problème particulier en théorie, la difficulté majeure en pratique est de disposer d'une base de données intégrant à la fois des variables économiques et agronomiques suffisamment détaillées. En ce qui concerne le transfert des polluants dans les aquifères, plusieurs modèles agronomiques sont disponibles (NLEAP) dont l'objectif est de fournir une évaluation de la concentration en polluants des eaux souterraines en fonction de la nature du sol et du climat (Meisinger et Randall, 1991, Boswell et al., 1985). Un problème peu abordé reste celui du transit des polluants de la zone de production vers les points de captage.

4.2.3. Méthodologie

Dans le cadre d'une convention entre l'INRA et le Centre d'Economie Rurale du Lot-et-Garonne, un échantillon de plus de 300 exploitants a été constitué sur la période 1992-1995. Les données disponibles portent sur les produits et les coûts relatifs à un certain nombre de cultures (maïs sec et irrigué, blé, tournesol, soja, sorgho fourrager, ray grass, bovins viande et lait). En particulier, les différents facteurs de production sont renseignés pour chaque culture (surface, engrais, phytosanitaires, semences). La première phase de l'étude consiste à bâtir un modèle de production agricole pouvant être utilisé pour évaluer l'impact de l'activité sur les niveaux de pollution, et les conséquences attendues de politiques environnementales sur la limitation de ces pollutions. Le modèle se distingue des approches antérieures de la littérature par les aspects suivants. Tout d'abord, si l'approche duale est retenue pour traiter le caractère multi-produits de l'activité, une procédure particulière est employée pour traiter le problème des productions nulles. Il existe en effet dans

l'échantillon des discontinuités dans les productions de chaque culture pour un exploitant, en raison des rotations culturales notamment. De plus, les producteurs pratiquent des combinaisons de cultures bien repérées, en fonction de l'existence d'un cheptel bovin ou non sur l'exploitation, ou de l'utilisation de l'irrigation. La solution retenue est de repérer les combinaisons culturales les plus importantes, et de classer les producteurs au sein de chaque catégorie, ce classement ne se modifiant pas au cours du temps. On spécifie ensuite une forme fonctionnelle flexible pour la fonction de coût (Translog) dans laquelle n'apparaissent que les productions de la combinaison à laquelle appartient l'exploitant. Ceci permet en outre de limiter le nombre de paramètres à estimer.

Des données climatiques fournies par Météo-France sont incorporées dans la fonction de coût, afin de repérer les éventuelles interactions entre l'utilisation des intrants et les précipitations ou températures saisonnières. Un travail cartographique préalable a été nécessaire pour identifier le point de mesure Météo-France le plus proche de chaque exploitant. Ces variables climatiques ont été croisées avec les prix des facteurs de production dans la fonction de coût.

De plus, le rôle des types pédologiques de sol a été intégré dans le modèle, de la façon suivante. Des relevés cartographiques sur le département du Lot-et-Garonne ont été fournis par la CACG (Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne) et la DDAF 47, sous la forme de Cartes Départementales des Terres Agricoles. Ces cartes très précises, au 1/50 000, ont fourni une information synthétique sur la classification des types de sol des exploitations. Là encore, un travail cartographique a été nécessaire pour apparier les exploitations et les zones indiquées. Cinq classes de sol ont été retenues, en fonction de la qualité moyenne et du potentiel agricole. L'avantage est ici de réduire le nombre de paramètres à intégrer dans le modèle, la nature des sols étant repérée par cinq variables indicatrices en tout.

La nature de l'échantillon disponible nécessite le recours à des méthodes spécifiques pour données de panel. Le terme d'erreur dans la fonction de coût peut être décomposé, faisant apparaître un effet individuel propre à chaque exploitant, et mesurant la composante du coût non observable par l'économètre (hétérogénéité non observable). Pour éliminer un éventuel biais d'endogénéité dû à la corrélation entre cet effet individuel et des variables explicatives du coût (par exemple le type de sol), la fonction de coût Translog est estimée par la méthode des Effets Fixes.

La deuxième phase de l'étude, en cours, consiste à estimer conjointement les paramètres technologiques des fonctions de production et les paramètres d'attitude face au risque. On s'écarte ici de l'approche duale pour utiliser la méthode de Antle (1987), consistant à estimer les coefficients d'aversion au risque de Arrow-Pratt et de Downside Risk à partir des données de production uniquement. L'intérêt de cette approche est de fournir non seulement une indication sur la variation du risque de production consécutive à des modifications des combinaisons d'intrants, mais encore de

distinguer les attitudes face au risque pour chaque facteur de production. Il est ainsi possible de tester dans quelle mesure les engrais azotés et les pesticides influencent la variabilité du rendement, et la façon selon laquelle les exploitants modulent leur utilisation pour se couvrir contre le risque de production.

La troisième phase de l'étude a consisté à recueillir des données de qualité des eaux dans le Lot-et-Garonne, dans un objectif d'évaluation de l'impact de l'activité agricole sur la pollution des eaux. Le choix s'est porté sur les concentrations en polluants des eaux superficielles, pour deux raisons. Tout d'abord, un réseau de mesure géré par l'Agence de l'Eau Adour-Garonne fournit des indications précises sur les niveaux de pollution dans le département, sur la période couverte par notre échantillon. Il n'existe pas de mesures comparables à grande échelle pour les eaux souterraines. Ensuite, l'utilisation de données relatives aux eaux de surface permet de s'affranchir de la modélisation agronomique nécessaire pour appréhender le transfert des polluants dans les nappes. Ces données seront utilisées ultérieurement pour modéliser la sensibilité des cours d'eau du Lot-et-Garonne à l'utilisation dans la production agricole de facteurs potentiellement polluants.

4.2.4. Premiers résultats

Les trois systèmes de cultures étudiés sont :

- a) Maïs irrigué, maïs ensilage, prairies permanentes et temporaires, élevage bovin lait ou viande ;
- b) Maïs sec, maïs ensilage, prairies permanentes et temporaires, élevage bovin lait ou viande ;
- c) Blé, maïs ensilage, prairies permanentes et temporaires, élevage bovin lait ou viande.

Pour le premier système a), l'effet des conditions climatiques sur le coût n'est pas significatif ; les variables de qualité des sols en combinaison avec le prix des intrants conduit souvent à un paramètre estimé significatif. Comme la fonction de demande d'un input est obtenue en dérivant la fonction de coût par rapport au prix de cet input, il est possible d'évaluer simplement l'incidence de la qualité du sol sur cette demande, en étudiant le paramètre associé à la combinaison prix de l'intrant \times variables de qualité. On constate ainsi que la qualité du sol n'a pas de conséquence significative sur la demande en engrais. Les produits phytosanitaires ont tendance à être utilisés plutôt sur des sols possédant de moins bonnes aptitudes, et la demande en travail augmente avec les sols de bonne qualité. La qualité du sol n'apparaît pas comme un facteur déterminant associé à la quantité produite. L'ajustement du modèle est très satisfaisant, avec un coefficient d'ajustement linéaire R^2 égal à 0.7987.

Pour le deuxième système de culture b), la seule variable de qualité du sol influençant réellement le coût est celle indiquant des sols peu aptes aux cultures céréalières, qui intervient de façon positive en association avec le niveau de production. De façon assez intuitive, la valeur positive et significative du paramètre indique qu'une production de maïs sec sur une terre peu fertile est relativement plus coûteuse. L'output de la culture principale (maïs sec) apparaît dans la fonction de coût via l'effet direct, le terme quadratique et les termes croisés avec les prix des intrants. On constate que les exploitants caractérisés par une activité d'élevage plus importante ont un coût relativement plus faible lorsque la production de la culture principale augmente. Enfin, l'ajustement du modèle est très proche de celui calculé pour le premier système de culture (R^2 égal à 0.81).

Pour la culture principale Blé (système c)), les conditions climatiques apparaissent de façon significative dans l'explication de la fonction de coût. Si l'on considère les paramètres des variables climatiques significativement différents de 0 seulement, on constate que les précipitations hivernales jouent à la baisse sur le coût de production, alors que les températures hivernales (de l'hiver précédent) et estivales jouent à la hausse. L'utilisation d'engrais est positivement corrélée avec la qualité du sol : les paramètres associés aux variables de qualité sont négatifs mais décroissants, indiquant que le coût diminue moins vite lorsque la qualité du sol se détériore.

A partir des estimations de la fonction de coût, on calcule les élasticités de substitution entre les intrants (élasticités de substitution d'Allen). Les élasticités de substitution d'Allen sont des indications précieuses sur le comportement de production des exploitants. Un signe positif de cette élasticité entre deux facteurs de production indique que les deux intrants sont substitués ; dans le cas contraire, ils sont complémentaires. Les inputs les plus intéressants pour cette étude sont ceux qui peuvent conduire à une pollution des eaux, à savoir les engrais et les produits phytosanitaires. D'un point de vue économique, il est important d'étudier les possibilités de substitution ou de complémentarité entre ces deux inputs et le travail. En effet, la quantité de travail est un bon indicateur de l'effort consacré par l'exploitant à l'observation de la progression de la culture. Cette activité de surveillance sert notamment à évaluer le degré d'infection des plantes par les pestes, à détecter un éventuel stress hydrique ou un manque d'azote dans le sol. Si le travail disponible pour l'exploitant est insuffisant et trop coûteux à augmenter, celui-ci peut être amené à substituer d'autres inputs au facteur travail, selon que ces inputs sont plus ou moins coûteux.

Les élasticités de substitution calculées indiquent une substitution possible entre les engrais et les produits phytosanitaires pour le maïs irrigué et le maïs sec, et une complémentarité pour le blé. Les engrais et le travail sont complémentaires pour les deux types de maïs et substitués pour le blé. Enfin, les produits phytosanitaires et le travail sont substitués pour le maïs irrigué mais complémentaires pour le maïs sec et le blé. Ces résultats montrent qu'il est difficile de conclure de façon générale quant à la

substitution entre des facteurs de production polluants et d'autres non. Le type de culture est un élément déterminant et les possibilités de substitution ou de complémentarité sont très différentes d'un système cultural à l'autre. Un cas important, souvent détaillé dans la littérature concernant la pollution de l'eau par les nitrates, est celui de l'utilisation d'engrais dans la culture du maïs irrigué. Pour cette culture, nos résultats indiquent que les engrais sont complémentaires au travail, et substitués aux phytosanitaires, ces derniers étant substitués au travail. Ce résultat indique que si le facteur travail n'est pas limitant sur l'exploitation, le producteur pourra épandre la quantité d'engrais azotés souhaitée en utilisant le niveau de main-d'œuvre nécessaire associé. Si par contre la quantité de travail disponible est limitée, la consommation d'engrais sera également contrainte mais les produits phytosanitaires pourront éventuellement être apportés en substitution. Bien entendu, le rôle des engrais azotés pour la croissance des plantes ne saurait être que très imparfaitement remplacé par des produits phytosanitaires dont la fonction est bien différente. Les résultats concernant les phytosanitaires doivent plutôt être interprétés par rapport au facteur travail, une partie de l'activité de surveillance des récoltes pouvant dans une certaine mesure être remplacée par un épandage plus important de produits phytosanitaires.

Nous simulons enfin une taxation des engrais afin d'évaluer le degré de sensibilité des exploitants à une telle politique. Les résultats doivent donc être compris comme des valeurs fictives dont la portée ne peut être qu'indicative. A la différence de la plupart des études antérieures, nous calculons la variation de la demande en engrais dans un cadre d'analyse multi-produits. L'impact d'une taxe sur les engrais sera par conséquent évalué de façon globale sur l'exploitation, plutôt que pour une seule culture. La simulation d'une taxe sur les engrais azotés consiste à faire varier de prix de cet intrant selon trois scénarios de hausse : 20%, 40% et 60%. La situation de base est celle pour laquelle le prix des engrais correspond au prix observé ; ce cas correspond à nos résultats des sections précédentes. Pour ces trois scénarios, la demande en engrais de chaque exploitant est recalculée à partir du nouveau prix des engrais. Notons qu'il est bien sûr nécessaire de recalculer également le coût total de production et les dérivées de la fonction de coût de chaque producteur. Enfin, l'impact des taxes est mesuré en termes relatifs plutôt que réels, par rapport à la situation de base.

Le tableau suivant indique les variations moyennes de la demande en engrais consécutives à une taxation de 20%, 40% et 60% des engrais azotés.

Tableau 4. 1. Variation de la demande en engrais suite à la taxe sur les engrais azotés.

Scénario	Taxe sur les engrais	Variation de la demande d'engrais
1	20%	-26.07%
2	40%	-50.39%
3	60%	-78.95%

Ces élasticités calculées au niveau de l'exploitation toute entière sont beaucoup plus importantes que celles trouvées dans la littérature. La demande en engrais azotés réagit à la baisse et de façon significative au taux de taxe, les pourcentages de diminution étant supérieurs à ce taux. Une justification peut être trouvée dans le fait que pour les cultures du maïs sec et irrigué, les élasticités de substitution entre engrais et travail étaient négatives, indiquant que ces deux facteurs sont plutôt des compléments. Ainsi, si les possibilités de compenser la hausse du coût des engrais en augmentant le facteur travail sont limitées ou même exclues, la demande en engrais sera relativement plus sensible à des hausses du prix de cet input. Pour évaluer l'impact de la taxation sur le coût total des exploitations, on calcule la variation de ce coût entre les trois scénarios et le cas de référence, et pour chaque système de culture. Le calcul du coût consécutif à la taxe tient bien sûr compte de la variation des demandes de facteurs de production. Les résultats sont les suivants.

Tableau 4. 2. Variation du coût total de production suite à la taxe sur les engrais azotés, par système de culture.

Taxe sur les engrais	Maïs irrigué	Maïs sec	Blé
20%	+4.18%	+3.55%	+3.69%
40%	+10.98%	+10.47%	+7.39%
60%	+15.20%	+18.15%	+11.09%

Le système de culture 1 (maïs irrigué) connaît la variation de coût la plus importante par rapport au cas de référence pour des taux de taxe de 20% et 40%. Pour un taux de 60%, le système 2 est le plus affecté des trois systèmes. Enfin, le système principal de culture basé sur le blé est le moins sensible à l'influence de la taxe, sans doute en raison du caractère moins indispensable des engrais azotés pour cette culture.

4. 2. 5. Conclusion

Ce travail s'inscrit dans la lignée d'une longue série d'études antérieures cherchant à prédire les comportements de fertilisation des agriculteurs confrontés à une taxe sur l'engrais. Elle met plus particulièrement l'accent sur la dimension risquée des choix de fertilisation des exploitants agricoles. La prise en compte du risque conduit à une estimation de l'impact d'une taxation sur la réduction des intrants polluants en agriculture beaucoup plus importante que ce qui avait été trouvé dans la plupart des études antérieures. Le modèle prédit en effet qu'une taxe majorant le prix des engrais de 20% serait suffisante pour atteindre un objectif de réduction de 26% de la fertilisation azotée.

5. MOYENS MIS EN OEUVRE ET HISTORIQUE DE LA RECHERCHE.

La poursuite de cette recherche mobilise trois chercheurs et un enseignant chercheur, ainsi qu'un ingénieur informaticien.. L'équipe encadre quatre thèses sur les thèmes du projet (trois boursiers MESR, bourses acquises en 96-97, et un doctorant cofinancé INRA-CEMAGREF depuis fin 97). Par ailleurs ces recherches ont permis d'encadrer cinq mémoires de DEA d'économie et deux stagiaires, dont un élève-ingénieur de l'INSA Toulouse, sur la durée du contrat.

La recherche engagée en 96 a porté sur la construction d'une demande d'eau potable pour les principales agglomérations du bassin Loire-Bretagne. Cette étude de faisabilité nous a convaincu de construire un projet ambitieux d'analyse des déterminants de la demande en eau des ménages. Nous avons pris des contacts avec différents fournisseurs potentiels de données. Ces contacts ont abouti à la mise en place de deux collaborations : l'une avec le CEMAGREF de Strasbourg, le BETA-CNRS de Strasbourg, l'ENGEES, l'ex CGE et l'OPHLM de Sarreguemines, permettant l'accès aux données de consommation d'eau de la Moselle, l'autre avec le Conseil Général de la Gironde et la Lyonnaise des Eaux à l'occasion du projet de SAGE départemental, nous apportant des données de la Gironde. A cette occasion, diverses conventions ont été conclues avec ces organismes courant 97. L'une d'elles a permis le cofinancement par l'INRA et le CEMAGREF d'un des thésards de l'équipe entre 1997 et 1999.

Parallèlement à cette action, nous avons poursuivi les contacts pris avec l'Agence de l'Eau Loire-Bretagne autour d'une réflexion sur les modalités de gestion de l'irrigation dans la Beauce. A cette occasion, nous avons entrepris l'application de notre modèle agro-économique aux agriculteurs de la Beauce pratiquant les grandes cultures. L'appui des agronomes de l'INRA nous a été très profitable au cours de l'année 97.

La recherche sur les pollutions diffuses a également bénéficié d'une collaboration engagée avec le CGER du Lot-et-Garonne, collaboration poursuivie dans le cadre d'une convention conclue en 97 avec cet organisme. Cette convention nous a permis d'accéder aux données nécessaires à l'étude des déterminants de la demande d'engrais des exploitants agricoles. Par ailleurs nous avons engagé en 97 une collaboration avec les laboratoires INRA-ESR de Grenoble et de Rennes autour d'une opération d'étude et de gestion de la pollution de l'eau à la Côte St-André, opération à laquelle participe l'INRA de Grenoble. Ces recherches se poursuivront en 98 et 99. La contribution de l'équipe dans ce projet porte sur la modélisation économique de différentes

politiques de maîtrise de la pollution par les nitrates.

Nous avons poursuivi l'effort méthodologique d'élaboration de schémas optimaux de régulation des pollutions diffuses. Nous avons accueilli pendant un an une doctorante américaine de l'université de Berkeley, Californie, sur ce thème. Plusieurs publications sont issues de cette collaboration.

Parallèlement à cette activité de collecte et de traitement de données, nous avons cherché à diffuser nos résultats dans la communauté scientifique : présentation dans divers congrès et séminaires, publications... Cela nous a permis d'engager des collaborations avec des économistes américains autour du thème général suivant : comparaison France/Etats Unis des déterminants de la demande en eau potable et de l'efficacité de différentes politiques de régulation des pollutions diffuses. Un chercheur de l'équipe doit se rendre début 98 aux Etats-Unis, en mission de longue durée, pour concrétiser cette collaboration.

6. CONCLUSION ET PERSPECTIVES 98.

Au terme de la première étape de cette action, nous avons pu réunir les données nécessaires à la réussite du projet. Nous avons estimé une fonction de demande en eau pour les départements de la Moselle et de la Gironde. Bien que ces dernières apparaissent faiblement élastiques aux prix, la différence constatée entre les demandes dans ces deux départements mérite une étude plus approfondie, étude que l'on conduira en 1998. Par ailleurs, il apparaît que l'on peut regrouper les consommateurs bordelais par districts géographiques homogènes, districts caractérisés par des demandes très différentes. Une étude plus fine de ses districts est intéressante pour un gestionnaire local de la ressource désirant répartir au mieux les charges d'adduction d'eau des ménages, une des préoccupations des partenaires du SAGE Gironde. Nous comptons également approfondir ce point en 98. Par ailleurs nous avons engagé fin 97 une étude parallèle portant sur les coûts de potabilisation et d'assainissement de l'eau en Lorraine. Cette étude, appelée à se poursuivre en 98 et 99, complétera utilement le volet demande de la recherche sur l'AEP.

Nous avons mis au point un outil de simulation d'une fonction de demande en eau d'agriculteurs irriguants, et nous avons commencé à tester ce modèle sur des données de la Beauce. En l'absence de données de prix et de quantités d'eau consommées par les agriculteurs, ce type d'outil peut contribuer à l'évaluation des incidences de différents schémas d'allocation de la ressource aux exploitants. Pour être pleinement pertinent, il doit être amélioré, particulièrement en ce qui concerne le traitement de l'ensemble de l'activité de l'exploitation.

Nous comptons étudier ce point en 98, en engageant une étude économétrique sur données comptables, étude dont le but est l'estimation d'une fonction de coût pour les agriculteurs de la Beauce en incluant l'irrigation.

Nous avons rassemblé les données nécessaires et nous avons entrepris une étude économétrique de la demande d'engrais des agriculteurs et des déterminants de leurs choix de fertilisation. A partir des résultats de cette étude, il nous est possible de simuler l'effet d'une taxation des engrais sur le comportement des agriculteurs. Cet objectif sera poursuivi en 98 avec les données du Lot-et-Garonne. L'étude engagée dans la région grenobloise fournira à terme d'utiles points de comparaison avec le cas étudié.

7. PUBLICATIONS 96-97 LIEES AU CONTRAT.

1. Belhajhassine N et A. Thomas, 1997, Agricultural Production, Attitude Towards Risk And The Demand For Irrigation Water : The Case Of Tunisia. Communication Présentée Au *Congrès Annuel De L'aere*, Tilburg, Pays-Bas.
2. Beragnes T Et P. Laborde, 1997, *Pratiques culturales et pollution d'origine agricole*. Mémoire de DEA ERNEA.
3. Bergere L., 1997, *Demande en eau potable et tarification*, Stage IUP Ingénierie Economique, CGE-ENGEES.
4. Bontems Ph Et A. Thomas, 1997, Optimal Contracts under Production Uncertainty and Split Nitrogen Application : An Empirical Investigation., *mimeo* ERNA-INRA.
5. Couderc J. M., 1997, *Analyse économétrique de la production agricole en présence d'incertitude*, Stage IUP Ingénierie économique, CGER Lot-et-Garonne.
6. Couture S., 1997, Modélisation du comportement d'un exploitant agricole averse au risque : choix d'une conduite d'irrigation à court terme. Note de travail.
7. Couture S., 1996, L'irrigation en France. Note de travail.
8. Couture S., 1997, Taxation de facteur de production, subvention et aversion au risque, *mimeo ERNA-INRA*, 33 p.

9. Diego V Et F. Fourcade, 1997, *Irrigation Et Gestion de la nappe de Beauce*. Mémoire de DEA ERNEA, 48 p + Annexes.
10. Lee Joon-Tae, 1997, *Stratégies de production et d'épuration des effluents, le cas des entreprises agro-alimentaires dans le bassin Adour-Garonne*. Mémoire de DEA ERNEA.
11. Millock K Et A. Thomas, 1997, Environmental Quality Enforcement and Continuous Monitoring : the Case of water Pollution in France. En cours de rédaction.
12. Millock K Et F. Salanie, 1997, Nonpoint source pollution regulation when polluters might cooperate. Communication présentée à *2st Conference on Environment and Resource Economics*, Toulouse, au *2st Seminar on environment in Girona*, Girona, Espagne, et au congrès de *l'ESEM*, Toulouse, France. 21 p.
13. Nauges C. Et A. Reynaud, 1997, Residential water demand : a survey ; *mimeo* ERNA-INRA, 23 p.
14. Nauges C. Et A. Thomas, 1997, Efficient Estimation of Residential Water Demand with Panel Data : The Case of France, *mimeo* ERNA-INRA.
15. P. Puech, Cabelguenne M., Attonaty J. M., Leroy P., Amigues J. P., Balas B. et V. Perarnaud, 1997, Gestion de l'eau à l'échelle de l'exploitation agricole, in *L'eau dans l'espace rural*, Riou C et alii, eds, INRA éditions, Paris.
16. Salanie F. Et K. Millock, 1997, Non point source pollution regulation when polluters might cooperate., *mimeo* ERNA-INRA.
17. Salles C., 1997, *Régulation de la pollution diffuse en information asymétrique*. Mémoire de DEA ERNEA, 29 p.
18. Thomas A. Et R. Weaver, 1996, Regulation of nonpoint source pollution when factor augmentation of polluting inputs is possible. Communication présentée au congrès de l'EAAE, Edimburgh, Grande-Bretagne et Congrès annuel ESEM, Istanbul, Turquie.
19. Vidal J., 1997, *Régulation de la pollution diffuse*. Mémoire de DEA ERNEA, 40 p.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES CITEES.

- Acary, J.P., 1997. Itinéraires techniques et intrants pour la culture du maïs grain Anjou 285.- Ed. Groupement de Développement Agricole de Sougy-Cravant, Sougy
- Agthe, D.E., And R.B. Billings [1996], « Water-Price Effect on Residential and Apartment Low-Flow Fixtures », *Journal of Water Resources Planning and Management*, 20-23.
- Ahn, S.C. And P. Schmidt [1995], « Efficient Estimation of Models for Dynamic Panel Data », *Journal of Econometrics*, 68, 5-27.
- Ahn, S.C. And P. Schmidt [1997], « Efficient Estimation of Dynamic Panel Data Models: Alternative Assumptions and Simplified Estimation », *Journal of Econometrics*, 76, 309-321.
- Amemiya, T. And T.E. Macurdy [1986], « Instrumental-Variable Estimation of an Error-Components Model », *Econometrica*, 54(4), 869-880.
- Anderson, T.W. And C. Hsiao [1981], « Estimation of Dynamic Models with Error Components », *Journal of the American Statistical Association*, 76, 598-606.
- Antle, J.M. (1987), Econometric Estimation of Producers' Risk Attitudes, *American Journal of Agricultural Economics*, 69, 509-522.
- Arellano, M. And S. Bond [1991], « Tests Of Specification for Panel Data: Monte Carlo Evidence and Application to Employment Equations », *Review of Economic Studies*, 58, 277-297.
- Babcock, B.A. (1992), The Effects of Uncertainty on Optimal Nitrogen Applications, *Review of Agricultural Economics*, 14, 271-280.
- Babcock, B.A. Acreage Decisions under Marketing Quotas and Yield Uncertainty, *Amer.J.Agr.Econ.* 72(Novembre):958-965, 1990.
- Babcock, B.A. et Hennessy, D.A. Input Demand under Yield and Revenue Insurance, *Amer.J.Agr.Econ.* 78(Mai):416-427, 1996.
- Babcock, B.A., Chalfant, J.A., et Collender, R.N. Simultaneous Input Demands and Land Allocation in Agricultural Production under Uncertainty, *Western J.Agr.Econ.* 12(2):207-215, 1987.
- Balestra, P. And M. Nerlove [1966], « Pooling Cross Section and Time Series Data in the Estimation of a Dynamic Model: The Demand for Natural Gas », *Econometrica*, 34, 585-612.
- Billings, R.B. [1982], « Specification Of Block Rate Price Variables in Demand Models », *Land Economics*, 58(3), 386-394.
- Binswanger, H.P. Attitudes toward Risk: Theoretical Implications of an Experiment in Rural India, *Economic Journal.* 91(Decembre):867-889, 1981.

- Boswell, F.C., J.J. Meisinger et N.L. Case (1985), Production, Marketing, and Use of Nitrogen Fertilizers, in *Fertilizer Technology and Use*, pp. 229-292, O.P. Engelstad Ed., Soil Science Society of America, Madison WI.
- Breusch, T.S., Mizon, G.E. And P. Schmidt [1989], « Efficient Estimation Using Panel Data », *Econometrica*, 57(3), 695-700.
- Burtless, G. And J.A. Hausman [1978], « The Effect of Taxation on Labor Supply: Evaluating the Gary Negative Income Tax Experiment », *Journal of Political Economy*, 86(6), 1103-1130.
- Chambers, R.G. et Just, R.E. Estimating Multioutput Technologies, *Amer.J.Agr.Econ.* 71(Novembre):980-995, 1989.
- Chambers, R.G. et Lichtenberg, E. Simple Econometrics of Pesticide Productivity, *Amer.J.Agr.Econ.* 76(Août):407-417, 1994.
- Chicoine, D.L. And G. Ramamurthy [1986], « Evidence on the Specification of Price in the Study of Domestic Water Demand », *Land Economics*, 62(1), 26-32.
- Chicoine, D.L., Deller S.C. And G. Ramamurthy [1986], « Water Demand Estimation Under Block Rate Pricing: A Simultaneous Equation Approach », *Water Resources Research*, 22(6), 859-863.
- Danielson, L.E. [1979], « An Analysis Of Residential Demand For Water Using Micro Time-Series Data », *Water Resources Research*, 15(4), 763-767.
- Deller, S.C., Chicoine, D.L. And G. Ramamurthy [1986], « Instrumental Variables Approach to Rural Water Service Demand », *Southern Economic Journal*, 53(2), 333-346.
- Foster, H.S., Jr. And B.R. Beattie [1979], « Urban Residential Demand for Water in the United States », *Land Economics*, 55(1), 43-58.
- Gibbs, K. [1978], « Price Variable In Residential Water Demand Models », *Water Resources Research*, 14(1), 15-18.
- Hansen, L.G. [1996], « Water And Energy Price Impacts on Residential Water Demand in Copenhagen », *Land Economics*, 72(1), 66-79.
- Hausman, J.A. And W.E. Taylor [1981], « Panel Data and Unobservable Individual Effects », *Econometrica*, 49(6), 1377-1398.
- Hewitt, J.A. And W.M. Hanemann [1995], « A Discrete/Continuous Choice Approach to Residential Water Demand under Block Rate Pricing », *Land Economics*, 71(2), 173-192.
- Höglund, L. [1997], « Estimation Of Household Demand for Water in Sweden and its Implications for a Potential Tax on Water Use », *mimeo*, University of Göteborg.
- Horowitz, J.K. et Lichtenberg, E. Insurance, Moral Hazard, and Chemical Use in Agriculture, *Amer.J.Agr.Econ.* 75(Novembre):926-935, 1993.

- Howe, C.W. And F.P. Linaweaver [1967], « The Impact of Price on Residential Water Demand and Its Relation to System Design and Price Structure », *Water Resources Research*, 3(1), 13-32.
- Huffman, W.E. An Econometric Methodology for Multiple-Output Agricultural Technology. Capalbo et Antle Eds., 1989,p. 229-244.
- Just, R.E. et Antle, J.M. Interactions between Agricultural and Environmental Policies: A Conceptual Framework, *American Economic Review*. 80(2):197-202, 1990.
- Kennedy, J.O.S. Rules for Optimal Fertilizer Carryover: An Alternative Explanation, *Rev.Marketing and Agr.Econ*. 54(2):3-10, 1986.
- Lambert, D.K. Risk Considerations in the Reduction of Nitrogen Fertilizer Use in Agricultural Production, *West.J.Agr.Econ*. 15(2):234-244, 1990.
- Leathers, H.D. et Quiggin, J.C. Interactions between Agricultural and Resource Policy: the Importance of Attitudes toward Risk, *Amer.J.Agr.Econ*. 73(Août):758-764, 1991.
- Meisinger, J.J. et G.W. Randall (1991), "Estimating Nitrogen Budgets for Soil-Crop Systems", *Managing Nitrogen for Groundwater Quality and Farm Profitability*, Chap. 5, Madison WI: Soil Science Society of America.
- Météo France, 1997. Colchique - Fichiers Banque pluvio de 1976 à 1997 des sites de Chateaudun, Chartres, Orléans, Pithiviers le Viel, Fontainebleau 1 et 2 - Ed. Météo France, Paris
- Moffitt, R. [1986], « The Econometrics Of Piecewise-Linear Budget Constraints », *Journal of Business and Economic Statistics*, 4(3), 317-328.
- Moffitt, R. [1990], « The Econometrics Of Kinked Budget Constraints », *Journal of Economic Perspectives*, 4(2), 119-139.
- Nieswiadomy, M.L. And D.J. Molina [1989], « Comparing Residential Water Demand Estimates under Decreasing and Increasing Block Rates Using Household Data », *Land Economics*, 65(3), 281-289.
- Nordin, J.A. [1976], « A Proposed Modification of Taylor's Demand Analysis: Comment », *The Bell Journal of Economics*, 7, 719-21.
- Opaluch, J.J. [1982], « Urban Residential Demand for Water in the United States: Further Discussion », *Land Economics*, 58(2), 225-227.
- Orazem, P.F. et Miranowski, J.A. A Dynamic Model of Acreage Allocation with General and Crop-Specific Soil Capital, *Amer.J.Agr.Econ*. 76(Août):385-395, 1994.
- Point, P. [1993], « Partage de la ressource en eau et demande d'alimentation en eau potable », *Revue économique*, 4, 849-862.
- Pope, R.D. et Just, R.E. On Testing the Structure of Risk Preferences in Agricultural Supply Analysis,

Amer.J.Agr.Econ. 73(Août):743-784, 1991.

Renwick, M. And S. Archibald [1997], « Demand Side Management Policies for Residential Water Use: Who Bears the Conservation Burden », *mimeo*, University of Minnesota.

Saha, A., Shumway, C.R., et Talpaz, H. Joint Estimation of Risk Preference Structure and Technology using Expo-power Utility, *Amer.J.Agr.Econ.* 76(Mai):173-184, 1994.

Scheffer, J.E. And E.L. David [1985], « Estimating Residential Water Demand under Multi-Part Tariffs Using Aggregate Data », *Land Economics*, 61(3), 272-280.

Sharpley A. N., et J.R. Williams, 1990, EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator : 1. Model Documentation. - United States Department of Agriculture Agricultural Research Service Technical Bulletin, 1768, 1-234.

Shumway, C.R. Supply, Demand, and Technology in a Multiproduct Industry: Texas Field Crops, *Amer.J.Agr.Econ.* 65(Novembre):748-760, 1983.

Taylor, L.D. [1975], « The Demand For Electricity: A Survey », *The Bell Journal of Economics*, 6, 74-110.

TABLE DES GRAPHIQUES ET TABLEAUX.

Tableau 3. 1. Principales études de la demande en eau pour l'AEP.....	12
Tableau 3.2 : Liste des variables de l'échantillon.....	13
Tableau 3.3. Modèle avec prix décomposé.....	16
Graphique n°4.2 : Itinéraires techniques pour la culture du maïs.....	22
Graphique n°4.4 : Apports hydriques journaliers en année sèche	24
Graphique n°4. 5. a : Comparaison du stress hydrique journalier avec/sans irrigation en année sèche	25
Graphique n°4.5. b : Comparaison de la réserve utile du sol avec/sans irrigation en année sèche.....	25
Graphique n° 4.6 : Fonctions de réponse à l'eau du maïs avec les itinéraires techniques recommandés/optimisés.....	26
Tableau 4. 1. Variation de la demande en engrais suite à la taxe sur les engrais azotés.	34
Tableau 4. 2. Variation du coût total de production suite à la taxe sur les engrais azotés, par système de culture.	35