



THÈSE

En vue de l'obtention du

DOCTORAT DE L'UNIVERSITÉ DE TOULOUSE

Délivré par l' Université Toulouse 1 Capitole
Discipline : Sciences Economiques

Présentée et soutenue par

Denis LANZANOVA
Le 8 septembre 2011

Titre :

**Économie de l'usage agricole de l'eau à
différentes échelles**

JURY

Jean-Pierre AMIGUES, directeur de recherche INRA
Delphine LEENHARDT, directrice de recherche INRA
Sylvie MORARDET, chercheuse au CEMAGREF
Arnaud REYNAUD, directeur de recherche INRA
Hubert STAHN, professeur, Université de la Méditerranée
Alban THOMAS, directeur de recherche INRA

Ecole doctorale : Toulouse School of Economics
Unité de recherche : LERNA - TSE
Directeurs de Thèse : Jean-Pierre AMIGUES et Arnaud REYNAUD

L'université Toulouse 1 Capitole n'entend ni approuver, ni désapprouver les opinions émises dans cette thèse : ces opinions doivent être considérées comme propres à leur auteur.

Remerciements

Je tiens en tout premier lieu à remercier mon directeur, Jean-Pierre Amigues, pour m'avoir donné l'opportunité de réaliser cette thèse. Son appui scientifique fut précieux et son expertise déterminante. Je suis également extrêmement reconnaissant à Arnaud Reynaud, mon co-encadrant, pour avoir toujours su être à l'écoute de mes interrogations avec patience et disponibilité. Ce travail n'aurait pas abouti sans son aide et son implication.

Je remercie Sylvie Morardet et Hubert Stahn pour l'attention qu'ils ont portée à mes travaux en me faisant l'honneur d'être rapporteur de cette thèse. Je leur sais gré pour leurs précieux commentaires. Je suis également reconnaissant à Alban Thomas, pour avoir accepté de présider le jury, et à Delphine Leehardt, pour en faire partie.

Je remercie le Lerna et l'Inra pour les conditions de travail dont j'ai pu bénéficier. D'un point de vue informatique, rien n'aurait été possible sans l'œuvre de Jean-Claude Poupa et le support de Stéphane Cézéra. Je n'oublie pas leur contribution. Je remercie également le personnel administratif et technique : Sylvie, Martine et Maxime.

Je ne saurais oublier de remercier mes collègues de l'Institut Supérieur d'Agriculture de Lille. Merci en particulier aux membres du pôle économie-gestion pour leur accueil chaleureux et leur gentillesse au quotidien.

Enfin, dans un registre plus personnel, je remercie tous ceux qui ont su me donner de l'énergie et de la motivation à chaque fois que cela était nécessaire : merci à Alia, Kheira, Sébastien, Marie-Hélène, Emmanuel, Martial, Delphine, Ruxanda, Imen, Joseph, Mathieu, Christophe.

Résumé

Cette thèse est une contribution à l'analyse de la rareté de l'eau d'usage agricole dans les climats tempérés. Elle propose des modèles d'allocation de la ressource en eau de la parcelle à l'échelle régionale au cours d'une campagne d'irrigation. Les applications empiriques de ces modèles sont basées sur une approche originale consistant dans le couplage de modèles économique et agronomique. La thèse comporte quatre chapitres. Le premier chapitre s'appuie sur l'étude des politiques de l'eau existantes pour illustrer l'état d'une ressource plutôt mal gérée dans le monde et met en évidence la nécessité d'élaborer une doctrine en matière de gestion de l'eau. Le deuxième chapitre présente les conditions sous lesquelles la fonction de demande en eau est identifiable et une méthode permettant de l'évaluer. Il est montré qu'une fonction de demande implicite peut être correctement reconstituée lorsque l'irrigant combine linéairement plusieurs plans d'irrigation sur un périmètre. Les implications économiques sont importantes : lorsque l'irrigation est contrainte par l'équipement, les itinéraires mis en œuvre par le cultivateur ne résultent pas d'un processus d'optimisation d'usage de la ressource. Le troisième chapitre étudie l'impact d'une interdiction temporaire de l'irrigation sur la fonction de demande en eau. On identifie deux phénomènes. D'un côté, un effet de "rationnement" entraîne une dépréciation de la ressource. D'un autre côté, un effet de "gaspillage" accroît le coût d'opportunité d'usage de l'eau. Le dispositif peut induire une consommation annuelle de ressource plus importante qu'en situation non régulée. Le quatrième chapitre considère le problème du partage d'une ressource en eau rare entre des agriculteurs hétérogènes confrontés au risque climatique. Un modèle d'allocation intra-annuelle de l'eau incorporant des choix endogènes d'allocation de la terre entre les cultures permet de calculer la répartition économiquement optimale de la ressource. Une application empirique est développée pour une petite région agricole du sud-ouest de la France. Les résultats montrent que des règles d'allocation de second rang affectent les profits individuels mais ne modifient pas significativement le surplus agrégé.

Mots-clés: irrigation, gestion de l'eau, programmation mathématique, couplage de modèles économique et agronomique, régulations des sécheresses, risque climatique.

Abstract

This thesis contributes to analyse agricultural water scarcity in temperate climate zones. It proposes models of allocation of water resources during the irrigation campaign at the field and the regional scales. Empirical applications follow an original approach consisting in coupling an agronomical model with an economical model. The thesis consists of four chapters. The first chapter leans on a survey of existing water policies to illustrate to which extent that the resource is mismanaged at the global scale and highlights the need for a doctrine in water management. The second chapter provides the satisfying conditions that guarantee the identifiability of the water demand function and gives a convenient method allowing to assess it. We show that identifying an implicit demand function can be properly accomplished when the farmer implements a linear combination of irrigation schedules on the land area. This result has strong economic implications : when irrigation is limited by the equipment, the farmer does not implement irrigation schedules that result from an optimization process of water use. The third chapter considers the impact of a temporary irrigation restriction on farmer's water demand function. We show that two opposite effects can affect water value downward or upward. On one side, a "yield loss" effect leads to a decrease of the value of the resource. On the other side, a "drainage effect" increases its opportunity cost. Therefore, imposing a water limitation at a given period will not necessarily induce a reduction of the yearly water consumption. The last chapter proposes an original framework for sharing a scarce water resource across a heterogeneous population of farmers facing climate uncertainty. An intra-annual water allocation model endogenizing farmer's crop choices and land use decisions gives the allocation of water that maximizes the welfare. An empirical application is developed for an agricultural area located in Southwest of France. Results show that second-best sharing rules does not significantly impact the overall regional surplus but imply water transfers across farmers affecting their individual profit.

Keywords: irrigation, water management, mathematical programming, economic and agronomic models integration, drought regulations, climate risk.

Table des matières

Introduction générale	1
1 Introduction aux régulations de la demande en eau d'usage agricole	7
1.1 Des politiques de gestion très variables	7
1.1.1 Une gamme d'instruments économiques	7
1.1.2 Faits stylisés sur les politiques menées dans le monde	11
1.1.3 Faits stylisés sur les politiques menées en France	18
1.1.4 Le constat d'un défaut de doctrine commune	23
1.2 Quel modèle de partage de la ressource ?	24
1.2.1 Des conflits d'usage	24
1.2.2 Le programme d'optimisation du bien-être social	24
1.2.3 Conditions suffisantes pour un partage optimal de la ressource	26
1.2.4 Des solutions de second rang	29
2 Identification de la fonction de demande en eau d'un irrigant	31
2.1 Introduction	31
2.2 Le modèle	34
2.2.1 Les stratégies du cultivateur	34
2.2.1.1 Des choix séquentiels	34
2.2.1.2 Une forme réduite	34
2.2.2 Le comportement du cultivateur	35
2.2.2.1 Fonction objectif et contraintes	35
2.2.2.2 Le problème de contrôle	36
2.2.2.3 La dimension spatiale	37
2.2.3 Les décisions optimales du cultivateur	39
2.2.3.1 Echelle d'une parcelle	39
2.2.3.2 Echelle d'un territoire	40
2.3 Application empirique	46
2.3.1 Conception : une procédure en deux étapes	46

2.3.1.1	Méthodologie	46
2.3.1.2	Etape 1 : simulation de rendements par un modèle biophysique	46
2.3.1.3	Etape 2 : résolution par optimisation d'un modèle économique	49
2.3.2	Résultats à l'échelle d'une parcelle	51
2.3.2.1	Stratégies	51
2.3.2.2	Fonction de profit	54
2.3.2.3	Fonction de demande	54
2.3.3	Résultats à l'échelle d'un territoire	55
2.3.3.1	Stratégies	55
2.3.3.2	Fonction de profit	60
2.3.3.3	Fonction de demande	62
2.4	Conclusion	64
3	Politiques de restriction d'usage de l'irrigation	65
3.1	Introduction	65
3.2	Le dispositif français	68
3.3	Le modèle	70
3.3.1	Un problème dynamique	70
3.3.2	L'autorité publique et l'irrigant individuel	72
3.3.2.1	Le rôle de l'autorité publique	72
3.3.2.2	Le programme de l'irrigant individuel	73
3.3.3	Conditions d'optimalité	75
3.4	Application empirique	76
3.4.1	Contexte climatique	76
3.4.2	Cadre d'analyse	77
3.4.2.1	Calibrage du modèle	77
3.4.2.2	Caractéristiques de la régulation	78
3.5	Résultats	79
3.5.1	Situation de référence : le cas non régulé	79
3.5.2	Réallocation intra-annuelle de la ressource	80
3.5.3	Impact de la restriction sur la valorisation de l'eau	86
3.6	Conclusion	91
4	Sharing water across heterogenous farmers under climate uncertainty	93
4.1	Introduction	93
4.2	The regional model of land and water use under climate uncertainty	96
4.2.1	Representation of the climatic risk	96
4.2.1.1	Climate as a stochastic event	96

4.2.1.2	Impact of climate on regional water availability	96
4.2.1.3	Modeling the impact of climate on crop yields	96
4.2.2	Regional agricultural model under climatic risk	97
4.2.2.1	A bottom-up approach	97
4.2.2.2	Farmer's individual problem	97
4.2.2.3	Regional objective function	100
4.2.3	The regional water allocation problem	101
4.3	An Empirical Application to Southwest of France	101
4.3.1	Economic and agronomic context	102
4.3.1.1	The agricultural region	102
4.3.1.2	The typology of farmers	102
4.3.1.3	Specification of economic data	103
4.3.2	Impact of climate	103
4.3.2.1	Climate and water availability	106
4.3.2.2	Climate and yield	106
4.3.3	Writing the agro-climatic-economical problem as an integrated model . . .	107
4.4	Results of the empirical application	108
4.4.1	The baseline case	108
4.4.1.1	The implicit regional value of water	108
4.4.1.2	Optimal intra-annual water use	109
4.4.1.3	Optimal land use in the baseline case	109
4.4.1.4	Optimal allocation of quotas in the baseline case	111
4.4.2	New allocation rules	114
4.4.2.1	Regional effects	114
4.4.2.2	Intra-type effects	115
4.5	conclusion	117
A	Calibrage du modèle de simulation agronomique (STICS)	119
A.1	Les caractéristiques du sol	119
A.2	Les caractéristiques climatiques	119
A.3	Stades phénologiques de la plante	120
A.4	Itinéraire technique	122
B	Annexes du chapitre 2	125
B.1	Calibrage du modèle de simulation agronomique (STICS)	125
B.1.1	Les caractéristiques du sol	125
B.1.2	Les caractéristiques climatiques	126
B.1.3	Stades phénologiques de la plante	128

B.1.4	Itinéraire technique	128
B.2	Résultats complémentaires	129
B.2.1	Année sèche	129
B.2.2	Année pluvieuse	130
B.2.2.1	Résultats à l'échelle d'une parcelle	130
B.2.2.2	Résultats à l'échelle d'un territoire	131
B.2.3	Année moyenne	135
B.2.3.1	Résultats à l'échelle d'une parcelle	135
B.2.3.2	Résultats à l'échelle d'un territoire	137
B.2.4	Descriptif des stratégies utilisées	140
C	Annexes du chapitre 3	141
C.1	Tarification de l'eau à objectif environnemental	142
C.1.1	Introduction	142
C.1.2	Le modèle	143
C.1.2.1	Cadre d'analyse	143
C.1.2.2	Le schéma tarifaire prescrit par le planificateur social	145
C.1.2.3	Le programme d'optimisation de l'irriguant individuel	147
C.1.2.4	Conditions nécessaires d'optimalité	149
C.1.3	Application empirique	152
C.1.3.1	Caractéristiques de la régulation	152
C.1.3.2	Résultats et implications	152
C.1.4	Conclusion	161
C.2	Résultats d'interdictions de l'irrigation à différentes périodes	163
C.2.1	Phase d'arrêt 7	163
C.2.2	Phase d'arrêt 10	163
C.3	Descriptif des stratégies	164
C.4	Descriptif des périodes	165
D	Annexes du chapitre 4	167
D.1	The Neste system	168
D.2	Cultural operations, soils and irrigation strategies	168
D.3	Calibration of the plant growth model (STICS)	169
D.3.1	Soils characteristics	169
D.3.2	Climate characteristics	170
D.3.3	Plant phenology	172
D.3.4	Cultural operations planning	173
D.4	Post-estimation of climate-contingent yield functions	175

D.5	Further results	178
D.5.1	Baseline case	178
D.5.2	New allocation rules	179
D.5.3	Impact of risk	180
D.6	Water scenario	180
E	Communication “How Irrigation Rationing Affect Water Value ?”	183
E.1	Introduction	183
E.2	The model	185
E.2.1	A dynamic problem	185
E.2.2	Farmer’s strategies	186
E.2.3	Farmer’s behavior	186
E.3	Demand function identifiability	187
E.3.1	Two space of strategies	188
E.3.2	Building a convex set	188
E.4	Empirical application	188
E.4.1	The Baïses river basin	188
E.4.2	Coupling biophysical and economic models	189
E.4.2.1	Using Stics to assess the impact of irrigation schedules on pro- duction	189
E.4.2.2	Solving the economical model by an optimization process	189
E.4.3	Data	190
E.4.3.1	Calibration of the biophysical model	190
E.4.3.2	Calibration of the economical model	191
E.5	Results	191
E.5.1	Impact of irrigation prohibitions on annual water value	191
E.5.2	Impact of irrigation prohibitions on agricultural water demand function	193
E.6	Conclusion	194
E.7	Appendix	195
E.7.1	Proof of lemma 1	195
E.7.2	Proof of proposition 1	196
E.7.3	Distribution of strategies	197
E.7.3.1	Baseline case (no restriction)	197
E.7.3.2	Irrigation prohibited from June 24 to July 10	197
E.7.3.3	Irrigation prohibited from August 03 to August 19	198
E.7.3.4	List of implemented strategies	198
E.7.4	Intra-annual water allocation for $\bar{Q} = 200$	198
E.7.5	Impact of irrigation restrictions on water value (exhaustive results)	198

E.7.6	Calibration of the plant growth model (Stics)	201
E.7.6.1	Soil characteristics	201
E.7.6.2	Climate characteristics	201
E.7.6.3	Plant phenology	202
E.7.6.4	Cultural operations planning	202
Conclusion		205
Bibliographie		209
Table des figures		221
Liste des tableaux		223

Introduction générale

L'eau douce est devenue un objet de débat important sous l'effet conjugué de la croissance démographique, du progrès technique en agriculture ou des conséquences à venir du réchauffement climatique. Elle est reconnue depuis la conférence de Dublin (1992) comme un bien économique. Par exemple, les rivières fournissent une multitude de biens et de services essentiels aux sociétés humaines, comme l'approvisionnement en eau des villes, la production d'électricité, des utilisations industrielles, la navigation et surtout, l'irrigation des terres agricoles. L'homme n'est en outre pas l'unique usager des cours d'eau : ils sont aussi une source de vie à la base d'un riche réseaux d'écosystèmes qui procure du bien-être. Longtemps, la ressource a été considérée comme inépuisable et pouvant être utilisée sans limites pour répondre aux besoins sociaux ou économiques. Mais la pression exercée par les activités anthropiques ne cesse d'augmenter : les prélèvements devraient s'accroître de 35 % d'ici 2025 [Johansson, 2005] et l'augmentation de la population prévue au cours la première moitié du XXI^e siècle (elle devrait atteindre 8,039 milliards en 2025 et 9,367 milliards en 2050) devrait conduire à une baisse des disponibilités individuelles en eau douce (estimée à 6918, 5103 et 4380 m³ par personne et par an, respectivement en 1998, 2025 et 2050) [World Resources, 1998]. Le développement de l'irrigation a entraîné une hausse de la demande et représente aujourd'hui 70 % des prélèvements et 93 % de la consommation mondiale d'eau [FAO, 2004]. Or, les milieux naturels requièrent pour leur bon fonctionnement un flux de ressource en quantité suffisante.

Les préoccupations croissantes de la population vis-à-vis de l'environnement pressent les autorités publiques à accorder une attention particulière à la protection des milieux aquatiques. Celles-ci peuvent recourir à différentes mesures de conservation mais dans le cas où l'on souhaite maximiser le bien-être des différents usagers, l'enjeu n'est pas de protéger les écosystèmes "à tout prix", en ce sens qu'une gestion raisonnable des rivières doit tenir compte à la fois des réalités écologiques et économiques. Dans un contexte de concurrence entre les besoins en eau des acteurs économiques et des milieux naturels, une allocation efficace d'un volume de ressource

disponible à un moment donné et à un endroit donné égalise les surplus marginaux des différents usages : c'est le partage des disponibilités qui maximise le bien-être que la collectivité tire de la ressource. Ainsi, si la société accorde une certaine valeur positive aux écosystèmes, une gestion efficace des eaux d'une rivière va supposer un arbitrage entre profits (industriels ou agricoles), bénéfiques générés par la consommation d'eau potable et bien-être retiré de la protection du milieu aquatique.

Malgré un état de rareté patent, la ressource reste cependant allouée de manière inefficace par les systèmes actuels [Saleth and Dinar, 1999]. Les travaux sur ce thème dévoilent que les politiques de l'eau habituellement mises en œuvre sont davantage le résultat de facteurs historiques, géographiques ou politiques, que de considérations d'efficacité économique [Dinar, 2000]. Les modes de gestion existants sont en effet très souvent hérités de systèmes établis au cours du temps ou prédéterminés par la répartition naturelle de la ressource dans l'espace. Des objectifs spécifiques fixés par les pouvoirs publics (autosuffisance alimentaire, récupération des coûts, redistribution de revenus) ou des considérations d'économie politique (satisfaction de clientèles comme les lobbies agricoles) peuvent jouer un rôle décisif dans la définition du système d'allocation. Enfin, il est important de noter que la réalisation de l'optimum social est rendue difficile par la dimension risquée de la gestion d'une ressource fortement soumise aux aléas de l'offre (facteur climatique) et de la demande (agricole en particulier). En ce sens, les études économiques imputent l'inefficacité de la répartition à des facteurs "extérieurs" à l'eau -l'histoire, la géographie, la gouvernance, le risque- sans que la pertinence des mécanismes de marché usuels ne soit remise en cause¹. Mais cela suppose de considérer la ressource comme un intrant ordinaire en niant ses spécificités physiques uniques, qui la distinguent de toutes les autres ressources : l'eau est un bien de dimension locale (il est difficile à transporter à faible coût) et circulant (il s'écoule, s'évapore, s'infiltre). Il est dès lors possible de penser que ce caractère insaisissable contraint fortement sa gestion et est de nature à rendre les systèmes économiques inaptes à résoudre les conflits de son appropriation. D'une part, des droits de propriété peuvent être difficile à établir et à faire respecter, d'autre part, l'aspect mobile de l'eau en fait un vecteur d'externalités spatiales et temporelles.

La relative hétérogénéité des politiques menées jusqu'à présent (coexistence de systèmes de répartition très différents) témoignent par ailleurs d'une absence de doctrine partagée sur les outils les mieux adaptés pour garantir l'équilibre entre une offre limitée et une demande globa-

1. Faculté d'un marché de droits à accomplir une allocation optimale par exemple.

lement en croissance (elle devrait croître de 22% dans les pays développés -principalement pour le secteur industriel- et de 43% dans les pays en voie de développement entre les années 2000 et 2020 [Johansson, 2000]). Il convient de développer pour cette raison, en parallèle de l'analyse des facteurs extérieurs à la ressource (la géographie, l'histoire, la science politique, le risque), une réflexion "centrée" sur l'eau elle-même. Cette thèse se propose de fournir une contribution à la compréhension des fondements microéconomiques internes qui rendent difficile la gestion de l'eau. Elle comporte 4 chapitres.

Le premier chapitre introductif présente la diversité des approches de gestion de l'eau dans le monde et en France et met en lumière la difficulté d'identifier les principes d'une répartition efficace. Il détaille tout d'abord les instruments économiques d'allocation et s'appuie ensuite sur les expériences de politique de l'eau pour illustrer l'état d'une ressource plutôt mal gérée au niveau national et international. Il est mis en évidence que le modèle promu actuellement de décentralisation de l'allocation au niveau des usagers se heurte aux difficultés d'un émiettement des compétences, ce qui pose la question du niveau pertinent de l'action publique et rend nécessaire l'élaboration d'une doctrine en matière de gestion de l'eau.

Le deuxième chapitre présente les conditions sous lesquelles la fonction de demande en eau est identifiable et une méthode permettant de l'évaluer. Il étudie les règles individuelles de comportement des irrigants et constitue en ce sens un travail préliminaire à l'analyse d'une régulation collective de la ressource sur de plus grandes échelles. On montre que les difficultés induites par le maniement de fonctions biologiques présentant des non convexités locales ont pour conséquence que l'usage de méthodes d'optimisation directes ne garantit pas que la solution optimale globale soit déterminée. Un moyen de surmonter cet obstacle est de transformer le problème original en un problème convexe. Il est montré qu'une fonction de demande implicite en eau peut être correctement reconstituée dans le cas où l'irrigant est en mesure de combiner linéairement plusieurs itinéraires d'irrigation sur une surface (l'ensemble de production est convexifié par combinaisons convexes de différentes valeurs de la fonction de rendement). Les implications économiques sont importantes : lorsque l'irrigation est limitée par une contrainte en facteur autre que celle de la disponibilité en eau, les itinéraires mis en œuvre par le cultivateur ne résultent pas forcément d'un processus d'optimisation d'usage de la ressource. Par exemple, un exploitant restreint par son équipement d'arrosage décidera de l'allocation de son quota davantage en fonction de sa contrainte de matériel qu'en fonction de sa contrainte en eau (si le coût d'opportunité de la contrainte de matériel est supérieur au coût d'opportunité de la ressource). Dans ce cas, cher-

cher à réguler la demande en eau par les prix est sans fondement parce que les choix d'usage de celle-ci sont surdéterminés par la contrainte de matériel. Il est alors possible de s'interroger sur la pertinence d'encourager l'adoption de systèmes tarifaires lorsque les irrigants sont sous-équipés (dans les pays en voie de développement notamment).

Le troisième chapitre propose une approche originale pour évaluer l'impact d'un arrêté d'interdiction temporaire de l'irrigation (assimilable à un mécanisme d'octroi de quota-période non reportable) sur la fonction de demande en eau et la valorisation économique d'un quota d'eau annuel. Il est montré que l'effet de cette disposition réglementaire est variable selon l'amplitude et la date à laquelle celle-ci est mise en place. La nouvelle allocation est le résultat d'un processus de ré-optimisation de l'emploi du quota global sur les sous-intervalles temporels non contraints (application du principe de Le Chatelier). On identifie deux phénomènes pouvant conduire à réduire ou accroître l'intensité de l'irrigation. D'un côté, un "effet de rationnement" entraîne une dépréciation de la ressource : l'irréversibilité des stress hydriques sur le développement de la culture conduit à réduire l'espérance de la valeur de l'eau (les efforts d'irrigation postérieurs à la restriction ne permettent pas de générer un rendement élevé). D'un autre côté, un "effet de gaspillage" accroît le coût d'opportunité d'usage de l'eau : la prohibition de l'irrigation à un moment donné incite l'agriculteur à effectuer des apports plus importants aux périodes non contraintes, ce qui constitue un gaspillage de ressource vis-à-vis de la situation non-réglée (apparition ou accentuation du drainage). Il est alors plus coûteux de réaliser une allocation intra-annuelle de l'eau qui soit "sans regret". Le résultat de la mise en place d'un tel dispositif est par conséquent ambigu. Il peut provoquer une augmentation ou une diminution de la valeur de l'eau et induire une consommation annuelle de ressource plus importante qu'en situation non réglée. On trouvera en annexe E une communication inspirée des résultats obtenus dans les chapitres 2 et 3.

Le quatrième chapitre (coécrit avec Arnaud Reynaud) considère le problème du partage d'une ressource en eau rare entre des agriculteurs hétérogènes confrontés à un risque climatique bidimensionnel (le climat affecte les rendements des cultures et la disponibilité en eau). Il est montré que des règles de répartition simples permettent d'atteindre un optimum de second rang qui n'est pas très éloigné de l'optimum de premier rang. Pour cela, un modèle d'allocation de l'eau incorporant des choix endogènes de culture a été développé. La solution donne pour chaque agriculteur les quotas d'eau qui permettent de maximiser l'espérance de l'utilité des profits agricoles obtenus au niveau agrégé. Il est possible de désagréger au niveau individuel les décisions d'usage de la terre et de l'eau. On propose en outre une approche empirique originale : un processus

d'optimisation est appliqué sur des fonctions de production agricoles climato-contingentes, économétriquement estimées à partir de données simulées par un modèle biophysique. Ce modèle microéconomique est ensuite intégré dans un modèle d'allocation régional. Des résultats de scénarios et de règles alternatives d'allocation de l'eau ont ainsi pu être évalués. Ils mettent en lumière que relativement à la répartition initiale maximisant le surplus, un partage de la ressource qui suit des principes simples (allocation basée sur la surface par exemple) modifie significativement les profits générés par les différentes cultures mais ne réduit que marginalement le profit total. Les agriculteurs adaptent leur choix d'assolement en fonction de leur quota d'eau, réallouant les surfaces entre les cultures irriguées et les cultures non irriguées. Ce processus d'optimisation permet de contrebalancer au niveau agrégé les effets négatifs d'une allocation sous-optimale (les profits individuels demeurent cependant affectés, négativement ou positivement).

L'annexe C étudie les effets d'une tarification environnementale des prélèvements en eau d'une rivière sur les comportements d'usage de l'irrigation. Une taxe proportionnelle aux dommages causés par la surexploitation de la ressource (mesurés par une fonction quadratique intégrant un effet de seuil) est introduite dans le modèle développé dans le chapitre 2. Il est montré que l'irrigant réalise alors des prélèvements jusqu'au point où la profitabilité marginale de l'eau devient égale au montant marginal de la taxe. L'introduction du système de taxation le conduit à réaliser des combinaisons linéaires de stratégies qui sont pondérées en fonction des montants des taxes associées. Les résultats des simulations mettent en évidence deux phénomènes. D'un côté, un "effet d'avancement" conduit à irriguer prématurément la culture de façon à retarder les stress hydriques sans dépasser le seuil d'exonération fiscale : les arrosages débutent plus tôt pour garantir le rendement en limitant le montant de la taxe à payer. D'un autre côté, un "effet de renoncement" peut mener à abandonner ou réduire l'irrigation : l'exploitant réalise un arbitrage entre le produit de la récolte et le coût de la taxe et il peut être profitable de réduire l'usage de l'eau aux périodes les moins critiques de la saison.

L'annexe D décrit en premier lieu le paramétrage du modèle de simulation agronomique (pour les différents sols et les différentes cultures) et fournit un exemple de fonctions de rendement contingentes au climat. Il présente ensuite des résultats complémentaires à ceux exposés dans le chapitre 4. La section D.5.3 détaille les effets d'une nouvelle règle de partage de l'eau entre exploitants sur l'allocation de la terre pour des agriculteurs averses au risque. La section D.6 expose les conséquences d'une baisse régionale des disponibilités en ressource de 15% : les résultats simulés concluent à une baisse d'environ 20% de la surface irriguée et de 5% du profit régional.

L'annexe E est une communication exposant de manière synthétique les résultats obtenus dans le chapitre 2 (conditions sous lesquelles la fonction de demande en eau est identifiable) et le chapitre 3 (impact d'une interdiction temporaire de l'irrigation sur la fonction de demande en eau). Une attention plus particulière a été prêtée aux raisons pour lesquelles le dispositif d'interdiction d'arrosage peut induire un accroissement de la quantité de ressource annuellement consommée.

Chapitre 1

Introduction aux régulations de la demande en eau d'usage agricole

L'émergence du débat public sur les problématiques liées à la politique de l'eau est lié en grande partie à l'usage intensif de l'irrigation. La raréfaction des ressources qui en résulte a conduit les pouvoirs publics à développer une gamme d'instruments de régulation appliqués de manière inégale dans les différents pays. Ainsi, pour faire face aux effets externes environnementaux provoqués par l'irrigation, un opérateur bénévole soucieux de maximiser le bien-être social et confronté à un déficit d'infrastructure d'offre de ressource, cherchera à en limiter l'usage. On présente dans une première section les régulations envisageables par les pouvoirs publics et celles mises en place dans le monde et en France (1.1). Une deuxième section introduit un cadre d'analyse pour un partage des disponibilités entre usages concurrents (1.2).

1.1 Des politiques de gestion très variables

1.1.1 Une gamme d'instruments économiques

Cette section présente succinctement les moyens d'intervention potentiels à la disposition des autorités publiques pour assurer la protection des milieux. Ces instruments de régulation comprennent les restrictions quantitatives, les mesures à base de redevances (tarification ou taxation) et les mesures basées sur des droits de propriété échangeables (marché de l'eau).

Instruments limitatifs Dans la gamme des restrictions quantitatives, on trouve les quotas non échangeables (annuels ou définis sur des périodes plus courtes)² et les procédures administratives d'interdictions d'arrosage³. Ceux sont les dispositions les plus couramment mises en place mais qui sont rarement défendues par les auteurs dans la littérature : certains leur reprochent de favoriser le gaspillage [Dinar et al., 1997] ou d'échouer à donner aux usagers les incitations permettant d'accroître l'efficacité de l'utilisation de l'eau (rien ne garantit que la ressource est allouée en priorité à ceux qui la valorisent le mieux) [Meinzen-Dick and Jackson, 1997]. En effet, d'une part, les quotas constituent des "stocks d'eau" attribués aux irrigants sur la base de variables arbitraires ("droits d'eau" historiques et rattachés à la terre ou octroyés selon des principes d'équité). D'autre part, les procédures d'interdictions de l'irrigation sont des mesures de rationnement uniformes, qui ne tiennent pas compte des différentiels de profitabilité du facteur "eau" entre les irrigants. Un schéma efficient de restrictions quantitatives supposerait la possibilité de discriminer les exploitants dans les mécanismes d'attribution des quotas ou de proscription de l'irrigation qui s'appliqueraient à chacun d'eux : dans ce cas, la ressource serait allouée entre les agriculteurs de façon à ce que les valeurs marginales de tous les quotas d'eau soient équivalentes ; de même, les interdictions d'irriguer seraient individuelles et "réparties" de manière à égaliser les pertes marginales de profit qu'elles induisent. Ce type de différenciation discrétionnaire, s'il est conceptualisable dans l'abstrait, n'est pas réalisable dans le réel. Outre les problèmes d'accès à l'information que rencontrerait le régulateur, la mise en place d'un tel dispositif violerait les principes du droit de l'eau et serait politiquement inconcevable.

Instruments incitatifs Les systèmes incitatifs à la modération de la consommation de la ressource comprennent les mécanismes de tarification et les marchés.

Tarification Les mécanismes de tarification visent à contrôler la demande et financer les infrastructures. Ils présentent des degrés de sophistication variables : on distingue les formes forfaitaires, qui se fondent sur la surface (redevance par unité de superficie irriguée), des formes volumétriques, qui reposent sur les quantités d'eau effectivement prélevées. Ces dernières sont parfois de configuration raffinée : à côté des tarifications au volume les plus classiques (de structure linéaire), on trouve aussi des tarifications par tranches (progressivité dans les prix appliqués aux volumes consommés) et des tarifs binômes (comportant une partie fixe et une partie va-

2. Les quotas échangeables sont évoqués ultérieurement dans le paragraphe *Marché*.

3. Nous étudierons les effets induits par une restriction d'arrosage dans le chapitre 3 et différentes règles d'allocation de quota dans le chapitre 4.

riable)⁴.

Le prix économiquement optimal de l'eau est celui pour lequel tous les coûts sont recouverts, y compris les coûts environnementaux et sociaux (ce prix est une notion variable puisque les effets externes liés à l'utilisation de la ressource sont fonction des périodes et des lieux). Horbulyk note cependant que le recouvrement des coûts et la tarification efficiente sont dans une certaine mesure deux objectifs distincts (dans le cas où le financement des infrastructures est assuré par le paiement de droits non liés au volume) [PRI, 2005] et Tsur précise qu'il suffit que la structure des prix soit telle que la dernière unité est payée au coût marginal [PRI, 2005]. Une fois la capacité en place, plus le produit est utilisé, plus le coût marginal (et donc le prix) est faible. Lorsque de nouvelles capacités d'offre s'avèrent nécessaires (au delà d'une certaine quantité de ressource fournie), un schéma de prix de l'eau croissant par bloc est approprié. En effet, le coût marginal (qui est principalement celui de la nouvelle infrastructure) peut devenir supérieur au coût moyen, et la tarification au coût marginal entraîne alors des profits excessifs pour le gestionnaire. Pour corriger ce déséquilibre, le prix du premier bloc est inférieur au coût marginal de sorte que les services d'eau produiront uniquement des recettes suffisantes pour couvrir leur coût d'exploitation, tandis que le prix du dernier bloc est égal au coût marginal [Hanemann, 1997]. Pour corriger un déficit lié au non financement d'un coût fixe important, une solution simple est d'introduire une partie fixe dans la tarification (barème en deux volets), les coûts d'exploitation étant couverts par la partie variable "au volume". En pratique, c'est la finalité principale des tarifs binômes : leur mise en place n'est pas motivée par le souhait de communiquer des signaux aux préleveurs (en intégrant une taxe pigouvienne significative basée sur le montant des prélèvements) mais est plutôt vue comme un procédé adapté pour recouvrir les coûts de distribution.

Marchés Les marchés peuvent être un moyen de palier aux inefficiences des systèmes d'attribution de droits d'eau (comme les quotas par exemple) ou de la tarification en contribuant à l'établissement du juste prix sans recourir à une planification. Dans un contexte parfaitement compétitif, l'introduction de dispositifs d'échanges commerciaux sur les droits permet aux utilisateurs qui leur accordent une valeur faible (à cause des conditions pédoclimatiques locales ou parce qu'ils sont moins performants) de les rentabiliser en les vendant aux utilisateurs plus susceptibles de les utiliser (qui en feront l'acquisition dans la mesure où leur disposition à payer -c'est à dire la valeur du profit marginal généré par une unité de ressource supplémentaire- est

4. L'impact d'une tarification non linéaire des prélèvements d'eau sur le comportement d'usage de la ressource d'un irrigant est analysé dans l'annexe C.1.

supérieure au prix du marché). Toutefois, si ce système permet de rétablir une allocation efficace des disponibilités globales (répartition de quotas annuels par exemple), il semble peu adapté à résoudre les conflits d'usage d'une ressource circulante comme les eaux d'une rivière ; en effet, le respect du "bon état écologique" des cours d'eau ne requiert pas seulement de maîtriser le total des prélèvements effectués mais aussi de garantir un seuil de débit minimum à chaque instant. Cela supposerait de mettre en place un marché spot (système continu d'échange de droits utilisables uniquement sur un intervalle de temps donné) dont le fonctionnement engendrerait d'importants coûts de transaction. Il existe en outre de nombreux effets externes qui modifient le fonctionnement des marchés : certains auteurs allèguent que le système des droits n'est pas suffisamment souples lorsque les ressources sont interactives et fluctuantes [Rose, 2004] et que l'eau, lorsqu'elle est gérée à petite échelle, peut-être mieux allouée au moyen d'ententes de coopération [Tietenberg, 2004].

Mécanismes d'ajustement et efficacité à long terme d'une régulation L'évaluation de la pertinence d'une régulation nécessite de tenir compte des processus d'adaptation des agriculteurs à ce nouvel environnement réglementaire. Par exemple, la sensibilité de la demande agricole en eau ne dépend pas uniquement de l'effet d'une augmentation de son prix sur le profit généré dans un système de production donné mais aussi des modifications apportées à ce système de production suite à l'augmentation du prix. En ce sens, les modifications de comportement des irrigants induites par des dispositifs incitatifs ou coercitifs sont en partie déterminées par des mécanismes d'ajustement mis en œuvre en réponse à la régulation. Ceux-ci peuvent concerner les choix d'assolement ou de culture⁵. Face à une augmentation du prix de la ressource, les exploitants peuvent réagir en optant pour des cultures moins consommatrices d'eau, voire pour des cultures en sec, si cela est possible : dans ce cas, l'élasticité-prix de la demande est forte. Au contraire, une absence d'alternatives rigidifie la réaction des agriculteurs (élasticité-prix faible). Il importe aussi d'intégrer des facteurs tels que : les disponibilités en terres (pour une éventuelle extensification) ou le type de technique d'irrigation utilisée. Par exemple, concernant les choix de technologie, l'adoption de procédés plus économes en eau peut permettre d'améliorer l'efficacité de l'utilisation de la ressource -et ainsi de maîtriser la demande- à condition que le bénéfice retiré du procédé plus efficient soit supérieur à son coût. Enfin, notons que l'appréciation de la performance d'une régulation est variable selon les échelles de temps considérées : à court terme,

5. Des simulations de modifications de choix d'assolement consécutives à une hausse du prix ou une baisse des disponibilités de la ressource sont présentées dans le chapitre 4.

l'assolement étant fixé, la demande en eau d'irrigation dépend uniquement de son prix et de sa profitabilité marginale pour un système de culture donné ; à moyen terme, l'assolement peut être modifié et la demande en eau est moins rigide ; à long terme, l'agriculteur réalise des décisions d'investissement et choisit son matériel de manière à optimiser l'utilisation de la ressource.

1.1.2 Faits stylisés sur les politiques menées dans le monde

On distingue les régulations mises en œuvre dans les pays en développement de celles mises en œuvre dans les pays développés.

Les régulations dans les pays en voie de développement

Les pays en voie de développement peuvent être classés dans diverses catégories selon les politiques de régulation de la demande en eau qu'ils ont adoptées. On les expose ci-dessous à travers une classification en trois groupes : les pays n'ayant pas mis en place de mécanismes incitatifs d'économie de la ressource ; ceux pour lesquels une régulation existe mais au travers de mesures limitées ; enfin, un troisième groupe constitué des pays engagés dans une politique volontaire de gestion de l'irrigation.

Le premier groupe rassemble les pays qui n'ont pas établi de dispositifs incitatifs ou de rationnement pour limiter l'usage de la ressource. C'est le cas dans certains Etats bien dotés en eau tels que la Slovaquie, la Croatie (prix forfaitaires très faibles) [Chohin-Kuper et al., 2002], la Moldavie ou l'Indonésie (prix nuls) [Tsur and Dinar, 1995]. En Albanie, il n'existe pas de réglementation légale pour facturer le prix de l'eau d'irrigation [Burak, 2002]. Mais la situation la plus extrême d'une eau gratuite est aussi observable dans des régions très arides comme en Egypte [Chohin-Kuper et al., 2003]. La place des instruments économiques ou réglementaires dans la gestion de la demande n'y est donc pas considérée comme prioritaire malgré la nécessité de gérer des disponibilités très limitées. Pour répondre à la croissance de la demande, des politiques de développement de l'offre y sont poursuivies, jusqu'à induire parfois l'épuisement de ressources non renouvelables (cas de la Libye) [Burak, 2002].

Un deuxième groupe rassemble les pays dans lesquels des régulations existent sous des formes adaptées aux situations locales mais limitées dans leurs propriétés incitatives. C'est souvent le cas des pays n'ayant pas encore établi les structures nécessaires à une gestion efficiente de la ressource. Par exemple, une tarification incitative basée sur une gestion volumétrique suppose le comptage des volumes consommés et par conséquent la mise à disposition de compteurs. Une

alternative à ce type d'investissement coûteux est de pratiquer une tarification forfaitaire fonction de variables facilement observables. Les plus courantes sont la surface, le type de culture ou le rendement. Le système de tarification à la surface présente l'avantage d'être uniforme et de ce fait facile à instaurer et à administrer. C'est le plus répandu sur tous les continents. En Arménie, il est adopté dans la plupart des grandes fermes collectives [Tsur and Dinar, 1995]. Au Nigeria, il est utilisé pour tous les prélèvements effectués en rivière (le montant de la taxe est déterminé par les autorités de bassin locales) [Tsur and Dinar, 1995]. Mais cette tarification est souvent combinée à une modulation des prix d'accès à la ressource en fonction des cultures. Une telle disposition est utilisée pour décourager (avec un prix élevé) le choix de celles qui sont les plus fortes consommatrices d'eau. Au Mexique, c'est un des instruments de régulation pour 45% des surfaces cultivées avec des tarifs basés sur la surface et variables selon la saison, la culture, et la structure juridique de l'exploitation. Le pays s'est en outre engagé dans de profondes réformes visant à promouvoir les mécanismes d'allocation décentralisés [Johnson, 1997]. Au Pakistan, les montants des contributions sont déterminés par un "patwari" (expert) ; ceux-ci sont fondés sur la surface et varient selon les provinces, les cultures, les saisons, ainsi que sur le flux de ressource dans les canaux ; mais ce système engendre la corruption par le biais de négociations informelles des agriculteurs avec les autorités de gestion des systèmes irrigués [Rinaudo, 2002]. Au Pérou, la méthode adoptée consiste aussi à imposer des taxes par unité de surface qui sont variables selon les cultures (en plus de celà, quand les cours d'eau sont en situation d'étiage, des règles de distribution sont définies sur un système de rotation) [Tsur and Dinar, 1997]. On trouve aussi des tarifs exclusivement fonction du type de culture (comme pour le maïs ou la tomate en Turquie [Chohin-Kuper et al., 2002]). Enfin, une dernière variable observable sur laquelle peut être établie la tarification est le montant de la récolte réalisé par l'irrigant. Ce mode de calcul du montant des charges d'eau permet aux agriculteurs de se prémunir des aléas sur les récoltes. C'est par exemple le système privilégié aux Philippines, où les prix sont en outre variables selon que les prélèvements d'eau aient été effectués en saison sèche ou humide. Notons que dans les pays très étendus, les différents systèmes peuvent coexister. En Inde, la tarification de l'irrigation prend des formes très variables selon les régions du pays [Saleth, 1997]. En Chine, le système d'allocation est très centralisé : la ressource est distribuée par des autorités administratives qui déterminent au préalable les prix (combinaison de taxes sur la surface et le capital) et les quantités [Johansson, 2000]. Mais le pays s'est engagé dans une réforme ambitieuse de sa politique de l'eau visant à promouvoir un système légal basé sur des permis ("Master Plan of the Water Law and Regulation System") à partir de 2010 [Saleth and Dinar, 1999]. Il est important

de préciser que les différentes tarifications décrites précédemment, même si ceux sont les plus répandues, n'excluent pas l'existence d'autres régulations. Au Chili par exemple, l'allocation de la ressource repose sur une gestion décentralisée originale établit par le code de l'eau (1981) : un système de droits d'eau transférables et indépendants de l'utilisation ou de la propriété de la terre permet aux irrigants d'accorder les besoins aux disponibilités (les transactions entre les agriculteurs offreurs et demandeurs s'effectuent sur un marché "spot" ouvert sur de courtes périodes) [Hearne and Easter, 1998]. Mais l'évaluation des performances sociales et environnementales de l'expérience chilienne nécessitent des études plus poussées [Bauer, 2004].

Le dernier groupe rassemble les pays en développement ayant mis en place les régulations les plus abouties. Ces pays se caractérisent par un climat aride et une hausse continue de la consommation pouvant mettre en péril la durabilité de la ressource. La demande y atteint souvent la limite des disponibilités, ce qui justifie les politiques volontaires encourageant l'économie de l'eau. Celles-ci impliquent presque toujours l'utilisation de la tarification mais dans des formes différenciées. Si elles sont toutes "volumétriques" (basées sur la quantité d'eau consommée), leur niveau et leur structure sont variables. Dans les pays d'Afrique du nord (Maroc, Tunisie), les tarifications "au volume" sont linéaires mais s'accompagnent d'autres éléments institutionnels (création d'agence de l'eau) [Chohin-Kuper et al., 2003]. Le Liban s'oriente plutôt vers l'adoption de tarifs binômes (cas des nouveaux périmètres de la Beqaa Sud) [Chohin-Kuper et al., 2002]. Au Mexique, les charges d'accès à la ressource sont calculées selon un taux progressif pour une proportion importante des surfaces (55% des terres qui sont irriguées grâce à des structures associatives [Johnson, 1997]). Un type similaire de tarification par palier avec un accroissement du prix de l'eau selon le total des quantités prélevées est aussi appliqué en Jordanie [Doppler et al., 2002]. Mais dans ce pays, la pression sur l'eau est forte et les prix (dans leur progressivité ou leur niveau) restent trop faibles pour avoir un effet suffisamment dissuasif sur la consommation. Enfin, l'évolution (annoncée) des prix dans le temps peut aussi contribuer à donner un signal de rareté de la ressource et induire une modification du comportement des irrigants [Dinar and Subramanian, 1997]. La Tunisie et le Maroc ont par exemple des plans d'augmentation de prix programmés. Ces réformes tarifaires ont conduit dans le passé à des baisses de consommation : en Tunisie, une augmentation des tarifs de l'eau (qui a atteint 400% entre 1990 et 2003) s'est traduite par une diminution significative des volumes prélevés. Parallèlement à ces dispositions, un effort considérable a été déployé pour généraliser les systèmes de comptage au niveau des exploitations agricoles irriguées [UNEP, 2007]. Mais les augmentations annoncées

n'ont pas toujours lieu et le non respect des engagements d'augmenter les tarifs donne un mauvais signal aux intervenants du secteur [Tennessee and Rojat, 2003]. Des politiques de hausses de prix sont également prévues en Jordanie ou au Liban [Chohin-Kuper et al., 2002].

Les régulations dans les pays développés

Des pays aux politiques faibles

Ce premier groupe de pays est certainement le plus hétéroclite parce qu'il rassemble des régions aux conditions climatiques très hétérogènes. Les orientations parfois prises par les autorités publiques pour adapter les demandes aux disponibilités, ainsi que le degré de la concurrence intra et inter-sectorielle pour la ressource sont aussi très spécifiques aux particularités historiques ou juridiques locales [Lallana et al., 2001]. Il est possible d'identifier les 3 sous-ensembles suivants : les pays qui n'envisagent pas de réforme ou de modification de leur législation ; les Etats qui s'orientent au contraire vers des évolutions dans leur politique de l'eau ; ceux enfin qui font face à des pénuries cycliques mais dont la mise en place de mécanismes incitatifs ou de rationnement se confronte à des difficultés d'ordre institutionnelles (dans l'ouest des Etats-Unis en particulier).

Dans certaines régions, l'irrigation constitue un appoint à des cultures en sec qui bénéficient par ailleurs de conditions climatiques favorables. La pression sur la ressource est faible et les agriculteurs ne sont par conséquent soumis à aucune restriction ou tarification d'usage de l'irrigation. En Suède par exemple, il leur suffit de demander une autorisation qui leur est délivrée gratuitement (les procédures sont similaires dans les autres territoires scandinaves). Aux Pays-Bas, les exploitants peuvent choisir de s'acquitter d'une taxe pour mise à disposition des eaux souterraines ou prélever eux-mêmes dans la nappe (à titre gracieux en deçà d'un débit donné) [Garrido, 1999]. D'autres pays n'ont pas adopté de politiques de régulation malgré l'occurrence de pénuries saisonnières. Au Portugal, la ressource est traditionnellement gratuite ; seules les infrastructures publiques peuvent appliquer une tarification (sous la forme d'une redevance) mais celles-ci représentent moins du quart des surfaces irriguées [Pinheiro and Saraiva, 2005]. La Grèce n'a pas arrêté pour le moment de position cohérente quant aux dispositifs de régulation de la demande en eau. L'organisation de sa gestion est encore régie par le code civil et la maîtrise des usages agricoles s'opère plutôt par le biais de restrictions quantitatives (en périodes de crise) que par des instruments économiques [Chartzoulakis et al., 2001]. La fourniture d'eau aux agriculteurs est généralement subventionnée : aucune redevance n'est prélevée pour l'eau d'irrigation provenant des grandes installations publiques, et l'eau des petits dispositifs municipaux est fournie à un prix très bas [OCDE, 2008].

D'autres pays en retard dans leur mode de gestion de l'eau prennent peu à peu conscience de la nécessité d'allouer de manière plus efficiente la ressource. Des réformes sont peu à peu adoptées, même si elles restent souvent limitées dans leur application à des projets locaux. En Espagne par exemple, les droits sur l'utilisation de l'eau sont couplés avec les droits d'utilisation de la terre. Cela se traduit par une tarification forfaitaire basée sur la superficie qui peut éventuellement déterminer la décision d'opter ou pas pour une culture irriguée mais pas sur la quantité d'eau apportée "à l'hectare" [Garrido, 1999]. Il existe une procédure permettant de modifier les droits sur l'eau de manière à promouvoir les systèmes volumétriques. Mais ces tarifications incitatives restent peu répandues et limitées à quelques initiatives collectives et privées (tarifs binômes avec quota dans des coopératives d'irrigation du Guadalquivir) [Berbel and Gomez-Limon, 2000, Mesa-Jurado et al., 2008]. Au Royaume-Uni, les prélèvements dans les cours d'eau requièrent le paiement d'une redevance (de l'ordre de 0.023-0.08 €/m³) [Knox and Weatherhead, 2003]. En Nouvelle-Zélande, tout usage agricole de l'eau requiert l'obtention de droits délivrés par les pouvoirs publics (les titulaires doivent payer une redevance). Mais toutes les demandes d'attribution de droits ne sont pas satisfaites et la demande d'eau pour l'irrigation augmente [Scrimgeour, 1997]. De plus, les sociétés qui fournissent la ressource aux irrigants sont la propriété des agriculteurs qui pratiquent des prix uniformes fonction uniquement des coûts de distribution. Or, les quantités prélevées dans les cours d'eau atteignent déjà la limite des disponibilités et il devient aujourd'hui nécessaire d'ajuster la gestion à cet environnement : il est admis qu'un changement dans l'allocation de l'eau ne pourra être réalisé qu'à travers la mise en place d'une tarification au volume et un système d'échange de droits [Garrido, 1999].

Enfin, dans certains Etats, l'évolution des cadres organisationnels conçus pour la gestion de l'eau peut être rendue difficile par les spécificités juridiques locales. Les pays d'Amérique du Nord voient notamment coexister plusieurs régimes d'attribution de la ressource, plus ou moins favorables à l'introduction de réformes. Au Canada, la gestion incombe aux provinces dans les limites de leur territoire respectif : elles légifèrent librement dans la répartition des droits d'usage des eaux (de surfaces ou souterraines) et le gouvernement fédéral se borne à régler les questions interprovinciales. Pour le moment, seul l'Alberta dispose de mécanismes incitatifs visant à modérer la consommation : des redevances au volume ont été introduites (alors que l'usage de l'eau est traditionnellement fortement subventionnée, jusqu'à 90% des coûts de distribution) et des mesures ont été prises pour mettre en place des marchés de droit (loi de 1996) [Horbulyk and Lo, 1998]. Mais ce régime est unique : les autres provinces ont adopté des tarifications publiques très faibles

qui ne sont pas conçues comme instrument de rationnement [Horbulyk, 1997]. Aux Etats-Unis, la répartition de l'eau est un domaine de compétence principalement étatique, les Etats du Nord et de l'Est se fondant sur des régimes de droits riverains, tandis que ceux de l'Ouest et du Sud s'appuient généralement sur des droits acquis [Commission de Coopération Environnementale, 2001]. Le régime des droits riverains est basé sur les principes de la *common law* et est moins rigoureux que celui des droits acquis⁶. La doctrine se fonde sur le principe d'un usage raisonnable : la quantité d'eau utilisée doit être raisonnable par rapport aux quantités des autres activités riveraines du cours d'eau. En outre, ce régime s'applique dans les Etats où la ressource est relativement abondante et dans lesquels il n'y a pas de conflit majeur pour son appropriation. Le principe des droits acquis, qui garantit l'usage de la ressource aux premiers l'ayant exploitée à des fins bénéfiques, s'applique en revanche dans les régions où le climat est aride [Krogh, 1995]. Or, leur remise en question, pourtant d'actualité, est d'autant plus difficile que certains titulaires allèguent qu'une mesure visant à les réglementer constituerait l'enlèvement d'un droit de propriété justifiant une indemnisation. Parallèlement, on trouve aussi dans ces Etats de l'Ouest des exploitants localisés dans des districts approvisionnés par les agences de l'eau. Malgré la situation de pénurie relative, l'irrigation est la plupart du temps subventionnée et une évolution vers l'instauration d'une tarification incitative semble peut probable : une telle réforme déstabiliserait le marché de la terre, dont le prix intègre les rentes d'accès à de l'eau bon marché [Wahl, 1989]. De ce fait, à l'exception du projet de mise en valeur de la vallée centrale de la Californie (loi de 1992) qui a permis d'établir un prix d'usage de la ressource pour l'agriculture et de mettre fin au renouvellement automatique des anciens contrats d'approvisionnement (au prix subventionné) [Gardner and Warner, 1994], la mise en place d'un système de tarification paraît invraisemblable dans la plupart des Etats. La politique de régulation de la demande s'oriente plutôt vers d'autres types de dispositifs incitatifs ou de mécanismes de marché : développement de banques de l'eau et de système d'échange facilitant les transactions "en nature"[Garrido, 1999].

Des pays aux politiques fortes

Le deuxième groupe de pays développés rassemble ceux menant des politiques de l'eau avancées. Il y a beaucoup d'initiatives intéressantes qui font appel à des systèmes d'allocation d'approches très différentes. Trois modèles de gestion distincts sont présentés ci-dessous : ceux de l'Italie, du Japon et de l'Australie.

6. En vertu de la règle de la *common law*, le propriétaire d'un terrain susjacent peut pomper autant d'eau souterraine qu'il le désire, à peu près sans responsabilité aucune pour les dommages causés aux propriétaires adjacents.

En Italie, le secteur de l'eau présente une situation très contrastée. Les tarifications existantes sont souvent de type forfaitaire à l'hectare et le niveau des redevances reste très faible (il a même baissé en terme réel) sur tout le territoire. De plus, des subventions ont été accordées dans le passé aux productions irriguées, ce qui a soutenu la hausse de la demande agricole. Pourtant, même si on ne trouve pas dans le nord de régulation satisfaisante, un programme ambitieux a été mis en œuvre avec succès dans le sud du pays [Bazzani et al., 2004]. D'une part, des quotas relativement bas (autour de $2000 \text{ m}^3/\text{ha}$) ont été imposés aux exploitants; d'autre part, il a été instauré un tarif binôme dissuasif. Ainsi, non seulement une consommation disproportionnée est coûteuse et économiquement inefficace mais les irrigants qui utilisent des volumes supérieurs aux niveaux préconisés risquent d'être frappés d'une interdiction de prélèvement [Mastrorilli, 1997]. En outre, une loi récente a rendu les autorités locales compétentes pour fixer les prix de l'eau; cette disposition inédite permet la mise en place de règles de nature à décourager tout gaspillage de ressource. La grande liberté accordée aux agences pour attribuer les quotas et pour déterminer le montant des redevances explique également la réussite de ce système de tarification [Destro, 1997].

Aux mesures incitatives italiennes correspond au Japon un modèle centralisé très différent : l'usage de l'irrigation est encadrée par une réglementation très stricte qui donne aux "Agences d'amélioration des terres" le pouvoir d'organiser des rotations et de répartir l'eau disponible entre les agriculteurs. C'est une gestion administrative rigoureuse même si elle ne vise pas à optimiser l'efficacité de l'utilisation de la ressource. La finalité du système est de garantir un accès minimum à l'eau (même en situation de sécheresse) et le partage n'est pas effectué selon un critère d'efficacité mais d'équité [Sarker and Itoh, 2001]. En ce sens, les politiques menées consistent à imposer des rationnements lorsque les circonstances l'exigent et n'accordent pas beaucoup d'importance aux instruments économiques de régulation. Les tarifications ne sont certes pas conçues pour encourager une utilisation rationnelle de l'eau (elles sont de type forfaitaire) mais elles font plus que compenser le recouvrement des coûts d'exploitation, d'entretien et de distribution [Cornish et al., 2004]. Il est cependant intéressant de noter que les pouvoirs publics semblent depuis peu favorables à une libéralisation du secteur et encouragent les transferts de droits d'eau entre irrigants [Nakashima, 1997].

Enfin, parmi les pays développés, l'Australie est sans doute celui qui a mis en œuvre les réformes les plus ambitieuses. Grâce à des changements institutionnels majeurs, un nouveau système de gestion a permis de réaffecter la ressource aux utilisateurs les plus performants. La principale mesure a consisté à découpler les droits sur l'eau de la terre : les droits sur l'eau

convertis en droits de propriété négociable, l'allocation des volumes disponibles a pu être optimisée par le biais de transactions commerciales [Musgrave, 1997]. Par exemple, un exploitant dont la rentabilité de la ressource est inférieure à la valeur de celle sur le marché est autorisé à vendre ses droits à un autre irrigant pour qui cette rentabilité est plus élevée. L'efficacité de l'utilisation de l'eau est en outre garantie par des principes qui régissent les stratégies de tarification : tout d'abord, les prix doivent être fixés en fonction du coût estimé de fourniture, sans discrimination entre agriculteurs ou terres de qualité différentes ; ensuite, les distorsions de prix entre les différents Etats de la fédération sont prohibées [Pigram, 1999, Turrall et al., 2005]. Notons que ces dispositions ont été accompagnées par d'autres éléments de politique environnementale comme l'augmentation des redevances ou le plafonnement des prélèvements (l'eau n'est plus librement mise à disposition).

1.1.3 Faits stylisés sur les politiques menées en France

Les politiques françaises de régulation de la demande s'appuient sur différents outils économiques. On distinguera les options qui visent à modifier les comportements des irrigants de celles qui règlent les problèmes de rareté et de conflit d'usage en imposant une restriction ou une norme.

Les régulations incitatives

Cette partie présente dans un premier paragraphe les options retenues par les pouvoirs publics pour inciter les exploitants agricoles à diminuer leurs prélèvements en eau. Un deuxième paragraphe présente des éléments d'évaluation de l'impact des politiques agricoles sur l'usage de l'irrigation.

Les outils tarifaires suscitent un intérêt croissant mais sont encore inégalement développés et très hétérogènes. Ils consistent le plus souvent en une tarification à la surface ou au volume⁷, plus rarement en des tarifs binomiaux (comportant une part variable calculée suivant le volume d'eau effectivement consommé) ou progressifs (avec un palier de prix fonction du volume prélevé). Les expériences de tarification relevées ci-dessous proviennent du rapport *Irrigation Durable* du Conseil Général du Génie Rural, des Eaux et des Forêts [Bertin et al., 2005] et du rapport d'expertise *Sécheresse et Agriculture* réalisé par l'Inra [Amigues et al., 2006].

7. La tarification de l'eau proportionnelle au volume consommé n'est présente que sur les périmètres gérés par des associations d'irrigants ou des sociétés d'aménagement rural [Amigues et al., 2006].

- On trouve un système de tarification à la surface dans les secteurs du bassin Rhône-Méditerranée et Corse où l’irrigation est gravitaire (qui représentent la plus grande partie des surfaces). Le forfait à l’hectare est compris entre 110 et 260 euros et est de 180 euros en moyenne [Bertin et al., 2005]. Mais la fonction première de ce type de tarification est de récupérer le coût de fonctionnement du service de mise à disposition de la ressource et son intérêt pour la gestion de l’eau est très limité.
- Le système de tarification au volume est le plus répandu. Il peut prendre la forme de redevances “ressources” ou de tarifs. Les redevances “ressources” sont exclusivement prélevées par les agences de l’eau en vertu du principe pollueur/payeur. Elles sont calculées en appliquant au volume prélevé un taux, très variable selon les bassins (de 0,13 centime d’Euro en Rhône-Méditerranée-Corse à 1,50 centime d’Euro en Seine-Normandie [Bertin et al., 2005]). Ce coût supporté par les irrigants, bien qu’il soit parfois modulé en fonction de la rareté de l’eau (cas des bassins RM&C et Adour-Garonne), reste cependant à un niveau très bas et n’a pas d’impact sur la consommation en eau d’irrigation. Les tarifs sont prélevés soit par les agences, soit par les compagnies d’aménagement. Leur niveau est plus significatif que celui des redevances. Mais dans le cas d’infrastructures collectives, c’est d’abord la nécessité d’assurer la couverture des coûts de distribution (entretien du réseau par exemple) qui a conduit les gestionnaires à tarifier l’eau selon des modalités définies dans les contrats passés entre les structures et les irrigants. Les tarifications restent ainsi peu utilisées dans une optique de gestion d’une ressource rare et davantage conçues comme un dispositif de contribution collectif à l’équilibre budgétaire.
- La tarification par tranches (le prix par mètre cube consommé varie par saut avec le niveau des prélèvements) est très peu utilisée. La compagnie d’aménagement des côtes de Gascogne (CACG) met en œuvre cet instrument dans une forme très limitée en le combinant à des quotas ou des débits souscrits : des tranches tarifaires ascendantes sont prévues dans le cas où l’irrigant dépasse le débit ou le contrat souscrit. Par exemple, pour le service “eau sous pression” avec un débit souscrit de 1l/s, le tarif est composé d’une partie fixe de 246 euros et d’une partie variable de 0,04 euros/m³, éventuellement majorée par des pénalités pour dépassement de débit. Le service “eau en rivière” qui inclue la souscription d’un débit de 1l/s et d’un quota de 4000 m³ pour un tarif très raisonnable de 50 euros prévoit des pénalités de dépassement de quota de 0,10 euros/m³ [Bertin et al., 2005].
- Les tarifs binômes (composés d’une partie fixe et d’une partie variable proportionnelle au volume consommé) sont présents dans différentes régions françaises. Dans les réseaux

collectifs sous pression du bassin Rhône-Méditerranée et Corse (compagnie nationale du Bas-Rhône-Languedoc et Société du Canal de Provence), les tarifs comportent une partie fixe qui correspond au débit souscrit (de 23 à 38 euros/ m^3 /h/ha) et une partie variable calculée suivant la consommation effective (avec une moyenne de 7,60 centimes d'euros/ m^3) [Bertin et al., 2005]. Les tarifs pratiqués dans le système Neste par la CACG (exposés ci-dessus), si l'on exclut les pénalités pour dépassement de débit ou de quota, s'apparentent aussi à des tarifications binomiales.

Certaines dispositions plus globales de politiques agricoles peuvent aussi induire une modification du comportement d'usage de l'irrigation par les agriculteurs. On discute dans le paragraphe suivant l'impact de la Politique Agricole Commune de juin 2003.

La réforme de la PAC mis en œuvre en 2005/2006 a dissocié l'attribution des subventions agricoles des cultures et du mode de production adoptés par les exploitants. Le "découplage" des primes PAC, même s'il n'est que partiel, n'est désormais plus favorable aux cultures irriguées. Les aides directes devenues des transferts forfaitaires, l'avantage comparatif de l'irrigation vis-à-vis d'un mode de culture "en sec" est réduit puisque son usage ne permet plus de bénéficier de primes avantageuses. En supprimant toute référence dans les aides à la nature de la culture, les producteurs ne déterminent désormais leur assolement (et par conséquent l'intensité de l'usage de l'irrigation) qu'à partir des prix des cultures sur les marchés agricoles. Ils choisissent les cultures les plus rentables, ce qui peut favoriser le développement de la monoculture [Butault and Delame, 2004]. Mais dans la pratique, les conséquences du découplage sont limitées. Des travaux basés sur des simulations ont prédit pour l'année 2008 une diminution de 8% des surfaces céréalières en Poitou-Charentes, 5% en Midi-Pyrénées (régions de plaine), 19% en Pays-de-Loire et une stabilité en Ile-de-France (la baisse de la surface nationale en céréales est de 5,4%) [Barkaoui and Butault, 2004]⁸. Ainsi, les effets sont mineurs à court terme dans le secteur des grandes cultures, même si l'incidence est forte dans l'affectation des surfaces entre les grandes cultures et les prairies [Gohin and Moschini, 2006]. S'agissant de l'impact de la réforme sur les consommations en eau, celles-ci diminueraient sensiblement. La réduction de la superficie irriguée entraînerait une baisse des prélèvements pour l'agriculture : les volumes d'eau consommés se réduiraient de 7% environ à l'échelle nationale. Mais les baisses de consommation seraient beaucoup plus significatives dans les régions où les conflits d'usage de la ressource sont récurrents

8. Il existe cependant des avis divergents, notamment sur la situation dans le bassin de l'Adour. Par exemple, la commission technique du maïs d'Arvalis avait avancé une diminution de la sole irriguée de 10 à 15% dans les 5 ans suivant la mise en place de la réforme alors que la CACG pronostiquait un accroissement de surfaces irriguées dans le secteur de la Neste [Bertin et al., 2005].

(baisses prévues des volumes consommés de 21% en Midi-Pyrénées, 12% en Poitou-Charentes et 8% en Aquitaine) [Buisson, 2008]. Ainsi, du point de vue de la demande en eau, les effets de la PAC de 2003 se perçoivent aisément.

Les régulations normatives

Les systèmes d'allocation décentralisés efficaces comme les tarifications binômes ou au volume supposent l'existence d'une organisation suffisamment élaborée pour en administrer la gestion (relevé des consommations, collecte des redevances). Cela peut être difficile à mettre en place et l'on observe alors d'autres formes de régulation. Dans les régions où la ressource est fortement contrainte, le gestionnaire ou les polices de l'eau optent plutôt pour une répartition centralisée par attribution de quotas (volumes d'eau alloués selon la surface ou, dans le cas des compagnies d'aménagement, le débit souscrit) ou en imposant des restrictions quantitatives (limitations de prélèvement pouvant aller jusqu'à l'interdiction de l'irrigation). Ces instruments sont utilisés sur le territoire français au travers de diverses approches de gestion, variables par leurs objectifs et l'intensité de la régulation pratiquée. Nous en donnons quelques illustrations ci-dessous.

En Poitou-Charentes, la nécessité de gérer les périodes de crise a conduit la police de l'eau à élaborer un système original de restrictions proportionnées à la gravité des situations. Le débit des rivières détermine les limitations réglementaires d'usage de l'irrigation, pouvant aller jusqu'à l'interdiction totale lorsque l'étiage du cours d'eau est très prononcé. Le système a prévu en outre un mode d'allocation inédit entre des agriculteurs coopérant dans un bassin versant donné : les exploitants participent à une gestion volumétrique consistant à restreindre les quantités d'eau accordées sur des sous périodes de la saison d'irrigation. A chacune est attribuée une fraction de la consommation annuelle, fonction des besoins estimés de la plante. Les agriculteurs doivent respecter ces quotas temporels, avec toutefois la possibilité de le dépasser légèrement à condition de le compenser sur la période suivante (de 7 à 10 jours). Lorsqu'il ne respecte pas ces règles, un autre système plus contraignant lui est alors imposé [Allain, 2000a, Allain, 2000b].

Dans la Beauce, la rareté de l'eau ne pose pas tant des problèmes de pénurie aux moments les plus critiques de la saison d'irrigation que des préoccupations de moyen terme relatif au niveau de la nappe et des réserves souterraines. Les politiques de préservation de la ressource consistaient initialement en des arrêts préfectoraux prohibant l'irrigation certains jours. Ces mesures rigides se sont avérées inappropriées au problème et pénalisantes vis-à-vis des exploitants : la limitation de l'usage agricole de l'eau par des dispositions "classiques" (restrictions administratives) soumettaient les irrigants à des contraintes temporelles inadaptées aux besoins des cultures, sans

que soient pour autant maîtrisés les prélèvements globaux. Ce système a été écarté au profit d'une gestion pluri-annuelle des disponibilités : des quantités individuelles de ressources librement utilisables dans le temps sont octroyées aux agriculteurs. Les quotas volume alloués sont définis en fonction du niveau de la nappe, la surface des exploitations et la nature des cultures [Allain, 2006]. Cette approche inter-annuelle (qui inclut le report des économies et des dépassements) s'est révélée être une politique de gestion raisonnée de l'eau à destination agricole : la possibilité de reporter le quota non consommé d'une année sur l'autre incite à l'économie d'eau⁹.

Dans certains cas, les exigences environnementales telles que le respect de débits d'étiage stricts combinées à des conditions pédoclimatiques défavorables conduisent à imposer localement des dispositifs très contraignants. Dans la Drôme, où les rivières connaissent des déficits estivaux sensibles, le recours aux quotas a été rejeté : un SAGE (schéma d'aménagement et de gestion des eaux) piloté par l'agence de bassin Rhône-Méditerranée et Corse soumet tout prélèvement à autorisation et va jusqu'à recommander le gel des surfaces irriguées du département. En parallèle, la chambre d'agriculture et la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt a introduit un dispositif de tour d'eau pour tout prélèvement dans les ressources superficielles : les irrigants sont contraints de mesurer et de déclarer les volumes prélevés auprès de la police de l'eau [Allain, 2006]. Cette réglementation est accompagnée d'un système de sanctions strictes si celle-ci n'est pas respectée (l'attribution des aides de la PAC est conditionnée à la conformité des retraits réalisés) [Bertin et al., 2005]. Dans les cas de fortes sécheresses, le recours à des arrêtés préfectoraux peut être utilisé pour prohiber partiellement ou totalement l'irrigation à un moment donné.

Dans les régions où la ressource est quantitativement suffisante (Champagne-Ardenne, Les Landes), les modes traditionnels de contrôle ou de répartition (comptage des eaux prélevées, quotas) permettent une régulation satisfaisante des consommations agricoles. En Alsace, où les conflits d'usage se limitent pourtant à quelques bassins versants sous-vosgiens, un système collectif de partage de la ressource s'est développé sous la forme de tours d'eau suite à la sécheresse de 2003 [Bertin et al., 2005].

9. Dans les régions où le quota est accordé pour une année limitée (une année par exemple) et qu'il n'existe pas de possibilité de report, l'irrigant qui ne consomme pas tout son quota une année perd ce qu'il ne consomme pas. Il est alors incité à consommer tout son quota.

1.1.4 Le constat d'un défaut de doctrine commune

La diversité des approches de gestion de l'eau dans le monde et en France a permis d'apprécier la difficulté d'identifier les principes d'une répartition efficace. Si l'ensemble des décideurs publics reconnaît que le mauvais usage de la ressource menace gravement le développement durable et l'environnement, la plupart ont en effet recours à un panachage de politique de marché et d'intervention directe sans certitude établie sur les avantages et des inconvénients de chacune des options. Dans le monde, la ressource est plutôt mal gérée et on n'observe pas de lien entre rareté et effort de gestion ; celui-ci n'est pas davantage corrélé au niveau de développement des pays. Cependant, la nécessité dans l'avenir de produire davantage avec une eau de plus en plus rare renforce l'exigence d'encourager une utilisation plus efficace et éventuellement de promouvoir une amélioration des modes d'administration existants.

Les sociétés ont historiquement été poussées vers une gestion publique de l'eau assumée par l'Etat ou par les collectivités locales¹⁰. Les tentatives de réforme de ce modèle en crise visent aujourd'hui à décentraliser l'allocation au niveau des usagers au travers de systèmes de tarification ou de marché de droits, l'objectif étant de partager de manière collectivement efficace la ressource. Les marchés sont considérés comme susceptible d'accroître l'efficacité de la répartition parce que le mécanisme de fixation de prix est négocié et non pas fixé de manière exogène. Un prix élevé favoriserait les comportements économes et serait à l'origine de choix de cultures moins consommatrices en eau. En outre, il permettrait de mobiliser davantage de ressources pour les autres usagers et éviterait la construction de projets de barrages et réservoirs très coûteux pour la collectivité. Cependant, l'eau est aussi un bien très sensible aux limites des mécanismes de marché. Les problèmes d'implémentation sont nombreux. D'une part, la segmentation des marchés de l'eau (limités à un bassin versant ou une portion d'aménagement) implique que le nombre de participants est limité. D'autre part, des coûts de transaction importants apparaissent : coûts de coordination, de négociation des contrats et d'accès à l'information. A cause de cela, les marchés de l'eau nécessitent d'être encadré par des institutions pour prévenir tout dysfonctionnements [Livingston, 1998]. Celles-ci doivent minimiser les incertitudes quant aux ressources disponibles (par l'intermédiaire de procédures qui garantissent que les quantités d'eau demandées sont satisfaites) en s'adaptant aux besoins des usagers et aux disponibilités de la ressource. Par conséquent, la décentralisation de la gestion de la ressource se heurte aux difficultés d'un émiettement des compétences. Ce problème de subsidiarité soulève la question du niveau pertinent d'action pu-

10. Les problèmes posés par le droit de riveraineté et celui du premier occupant ont par exemple rendu difficile l'adoption de marchés de droits [Anderson and Snyder, 1997]

blique. En ce sens, un défi majeur réside dans la définition d'une doctrine en matière de gestion de l'eau. Cette thèse a vocation à apporter une contribution au débat sur l'allocation optimale de la ressource et de proposer une démarche nouvelle dans son évaluation et sa mise en valeur.

1.2 Quel modèle de partage de la ressource ?

1.2.1 Des conflits d'usage

L'eau fait l'objet de multiples usages qui peuvent être marchands ou non marchands. Les usages marchands correspondent à l'alimentation en eau potable des populations (AEP) et à l'utilisation de la ressource comme facteur de production (secteurs agricoles, industriels et énergétiques). Les usages non marchands font référence aux besoins en ressource des écosystèmes et aux diverses activités en relation avec le milieu qui procurent d'autant plus de bien-être que celui-ci est préservé. Le caractère de propriété commune de la ressource est source de conflits pour l'appropriation de celle-ci par divers utilisateurs. Si l'enjeu de la régulation est de maximiser le surplus social retiré de disponibilités limitées en eau, la puissance publique cherchera alors à les partager entre les différents usages en tenant compte du bien-être retiré de chacun d'entre eux.

Les deux sections suivantes présentent un modèle d'allocation d'un stock d'eau entre deux usages concurrents, ainsi que les conditions nécessaires pour que cette allocation soit optimale. La dernière section traite des difficultés d'évaluer les bénéfices écologiques de la protection des hydrosystèmes et des solutions de second rang qui peuvent être mises en œuvre par les pouvoirs publics.

1.2.2 Le programme d'optimisation du bien-être social

Supposons que le planificateur social cherche à maximiser une fonction de bien-être \mathcal{W} , qui est une somme pondérée du surplus agricole net S_A et du bénéfice environnemental B_E , pour un stock d'eau limité \bar{S} . Le niveau de S_A dépend du volume d'eau q_A apporté à la culture par l'irrigation et celui de B_E de la quantité de ressource q_E restant disponible pour l'écosystème de la rivière. On suppose les hypothèses suivantes vérifiées.

D'une part,

$$\frac{dS_A(q_A)}{dq_A} \geq 0 \quad (1.1)$$

$$\frac{d^2 S_A(q_A)}{d^2 q_A} \leq 0 \quad (1.2)$$

D'autre part,

$$\frac{dB(q_E)}{dq_E} \geq 0 \quad (1.3)$$

$$\frac{d^2 B(q_E)}{d^2 q_E} \leq 0 \quad (1.4)$$

c'est-à-dire que les fonctions de surplus agricole et de bénéfice environnemental sont croissantes et concaves dans leur argument respectif. Notons que puisque les relations 1.1 et 1.2 impliquent que le profit réalisé par l'agriculteur irrigant est d'autant plus élevé que les apports en eau sont importants, les cas où une trop grande quantité d'eau serait appliquée au champ sont négligés. De façon similaire, les équations 1.3 et 1.4 signifient que sont exclus de l'analyse tous les phénomènes d'excès de ressource dans les cours d'eau.

Soit (α_A, α_E) les poids que la société accorde aux deux usages de l'eau considérée (agriculture et environnement), le problème de détermination de l'allocation optimale peut être formulé de la façon suivante :

$$\max_{\{q_A, q_E\}} \alpha_A S_A(q_A) + \alpha_E B(q_E) \quad (1.5)$$

$$s/c \quad q_A + q_E \leq \bar{S} \quad (1.6)$$

Notons que puisque le problème se limite à déterminer le partage d'une ressource finie entre deux usages exclusifs, et que les fonctions $S_A(q_A)$ et $B(q_E)$ sont croissantes et monotones, le programme peut s'écrire :

$$\max_{q_A} \alpha_A S_A(q_A) + \alpha_E B(\bar{S} - q_A) \quad (1.7)$$

$$s/c \quad q_A \leq \bar{S} \quad (1.8)$$

Dans ce cas, les relations 1.1 et 1.2 sont conservées. En revanche, le bénéfice environnemental est présumé décroissant et convexe en q_A tel que $\frac{dB(\cdot)}{dq_A} \leq 0$ et $\frac{d^2 B(\cdot)}{d^2 q_A} \geq 0$. En effet, la ressource

qui circule dans le cours d'eau, net des retraits pour les usages agricoles, est le support de vie des espèces végétales et animales présentes dans le milieu : $\bar{S} - q_A$ doit à la fois être suffisant pour assurer la consommation naturelle en eau des plantes, le maintien de la vie de la faune aquatique et la salubrité du milieu. L'écosystème est ainsi d'autant mieux protégé que la quantité d'eau restante disponible pour la nature est importante.

Un problème d'arbitrage Le planificateur est confronté à un problème d'arbitrage puisqu'il doit répartir le stock de ressource \bar{S} entre l'agriculture (qui prélève q_A) et l'hydrosystème (qui conserve $q_E = \bar{S} - q_A$). Tant que le surplus agricole marginal procuré par une irrigation d'un certain montant est supérieur au surplus "écologique" marginal qui pourrait être généré par une quantité d'eau dans la rivière d'un montant équivalent, il convient de laisser l'exploitant réaliser ses prélèvements (car l'agriculture valorise "mieux" la ressource que l'environnement). Lorsque les surplus marginaux de ces deux usages sont égaux, il convient d'interdire à l'irrigant de prélever davantage de ressource. A ce point est associé le partage socialement optimal de \bar{S} entre les deux usages. L'allocation optimale suppose par conséquent que les utilités marginales de l'eau pour chacun des deux usages (agriculture et environnement) soient égales. Cette situation correspond à la répartition inter-usages qui maximise $\mathcal{W}(q_A, q_E)$.

Seuls l'irrigation et la préservation de l'environnement aquatique sont prises en considération par ce modèle. Il aurait été possible de considérer d'autres usages comme l'eau potable ou à destination industrielle. L'analyse n'aurait pas été modifiée : les mécanismes d'arbitrages conduiraient à répartir la ressource de façon à ce que les surplus marginaux associés à chaque utilisation soient égaux.

1.2.3 Conditions suffisantes pour un partage optimal de la ressource

En notant λ_S le multiplicateur associé à la contrainte de stock, le lagrangien s'écrit :

$$\mathcal{L} = \alpha_A S_A(q_A) + \alpha_E B(q_E) - \lambda_S (q_A + q_E - \bar{S}) \quad (1.9)$$

Lorsque la forme des fonctions est standard comme celles spécifiées par les relations 1.1, 1.2, 1.3 et 1.4, les conditions de premier ordre sont les conditions suffisantes d'un partage optimal de la ressource :

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_A} = \alpha_A \frac{dS_A(q_A)}{dq_A} - \lambda_S = 0 \implies \lambda_S = \alpha_A \frac{dS_A(q_A)}{dq_A} \quad (1.10)$$

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial q_E} = \alpha_E \frac{dB(q_E)}{dq_E} - \lambda_S = 0 \implies \lambda_S = \alpha_E \frac{dB(q_E)}{dq_E} \quad (1.11)$$

$$\iff \alpha_A \frac{dS_A(q_A)}{dq_A} \stackrel{(a)}{=} \alpha_E \frac{dB(q_E)}{dq_E} \stackrel{(b)}{=} \lambda_S \quad (1.12)$$

- L'égalité (a) $\alpha_A \frac{dS_A(q_A)}{dq_A} = \alpha_E \frac{dB(q_E)}{dq_E}$ indique que le partage optimal de la ressource entre l'irrigant et le milieu s'établit au point d'égalité entre le surplus marginal agricole et le bénéfice environnemental marginal, pondérés par leur poids politique respectif. Notons qu'une simple égalité des surplus marginaux non pondérés ne correspond à une allocation économiquement efficace que si $\alpha_A = \alpha_E$. En ce sens, si le gestionnaire considère par exemple que l'utilisation de la ressource à des fins agricoles est prioritaire vis-à-vis de la protection de l'écosystème (ie. $\alpha_A > \alpha_E$), alors le surplus marginal agricole doit être supérieur au bénéfice environnemental marginal $\left(\frac{dS_A(q_A)}{dq_A} > \frac{dB(q_E)}{dq_E} \right)$.
- L'égalité (b) $\alpha_E \frac{dB(q_E)}{dq_E} = \lambda_S$ établit que le coût marginal d'opportunité de la contrainte de ressource disponible doit être égal à la valeur commune des surplus marginaux (agricole et environnemental) pondérés de leur poids politique. Précisons cependant que les notions de surplus agricole marginal, bénéfice environnemental marginal et coût d'opportunité marginal sont distinctes les unes des autres et ne sauraient être confondues.

Surplus agricole marginal, bénéfice environnemental marginal et coût marginal d'opportunité de la ressource

Dans le cas où le bien-être social est posé égal à une somme de surplus non pondérés, l'égalisation à l'optimum du coût marginal d'opportunité du stock au surplus agricole marginal et au bénéfice environnemental marginal peut prêter à confusion quant à son interprétation. En particulier, il serait faux d'assimiler le coût d'opportunité de la ressource à la valeur de la protection du milieu. On définit ci-dessous les trois concepts intervenant dans la relation 1.12.

Surplus agricole marginal C'est la disposition maximale à payer *de l'agriculteur* pour bénéficier d'une unité de ressource supplémentaire au-delà du volume qui lui a déjà été alloué.

La relation donnant pour chaque niveau du quota d'eau alloué à l'irrigant le prix que celui-ci est prêt à payer pour relâcher cette contrainte est sa fonction de demande inverse en eau ; si les hypothèses 1.1 et 1.2 sont vérifiées, cette fonction est décroissante avec \bar{S} .

Bénéfice environnemental marginal C'est le bénéfice social qui serait procuré par la présence dans le milieu d'une unité marginale de ressource, c'est à dire d'une unité de ressource au-delà du volume qui lui est déjà consacré. La fonction de bénéfice environnemental marginal est identifiée par la relation donnant $\frac{dB(q_E)}{dq_E}$ pour chaque $q_E = \bar{S} - q_A$ (volume de ressource réservé à l'écosystème de la rivière) ; si les hypothèses 1.3 et 1.4 sont vérifiées, cette fonction est décroissante avec \bar{S} .

Coût marginal d'opportunité C'est la disposition marginale à payer *de la société* pour que la contrainte de disponibilité globale de la ressource soit relâchée d'une unité au-delà de \bar{S} . En ce sens, λ_S est le "coût" de la rareté de la ressource vis-à-vis de l'ensemble des usages (rente de rareté).

Fonction de dommage environnemental

Dans le programme décrit par les équations 1.5 et 1.6, la dimension économique de la protection de l'environnement est introduite par l'intermédiaire de la fonction de bénéfice $B(q_E)$. Une approche alternative consiste à définir une fonction de dommage environnemental, croissante avec les prélèvements effectués dans la rivière pour tous les usages non environnementaux.

Soit $\mathcal{D}(q_A)$ une telle fonction de dommage. On suppose que celle-ci est croissante et convexe avec q_A , qui est le volume de ressource consacré à irrigation :

$$\frac{d\mathcal{D}(q_A)}{dq_A} \geq 0 \quad (1.13)$$

$$\frac{d^2\mathcal{D}(q_A)}{d^2q_A} \geq 0 \quad (1.14)$$

Le programme de maximisation du planificateur s'écrit :

$$\max_{q_A} \alpha_A S_A(q_A) - \alpha_E \mathcal{D}(q_A) \quad (1.15)$$

Une condition nécessaire et suffisante pour une allocation optimale est alors :

$$\alpha_A \frac{dS_A(q_A)}{dq_A} = \alpha_E \frac{dD(q_A)}{dq_A} \quad (1.16)$$

La relation 1.16 signifie qu'à l'optimum, le surplus agricole marginal pondéré est égal au dommage écologique marginal pondéré. C'est un résultat standard en économie de l'environnement : le niveau de protection économiquement efficace est celui pour lequel le coût marginal social de la dégradation du milieu est égal au bénéfice marginal social de cette dégradation en terme de gain pour les utilisateurs de la ressource.

Il est important de préciser qu'une telle formulation présente l'inconvénient de ne pas prendre en compte la contrainte de disponibilité de la ressource. L'approche basée sur la spécification d'une fonction de dommage impute la totalité des dégâts écologiques aux activités entropiques, en négligeant les situations de pénurie naturelle de l'eau. En ce sens, l'utilisation d'une fonction de bien-être social telle que celle définie en 1.15 convient plutôt à l'étude des problèmes d'effets externes¹¹.

1.2.4 Des solutions de second rang

L'introduction des considérations écologiques dans le raisonnement économique de la gestion de l'eau soulève la difficulté d'évaluer les gains (monétaires) de la protection des écosystèmes. Les méthodes utilisées, qu'elles soient indirectes (méthodes des coûts de transport ou des prix hédonistes) ou directe (évaluation contingente) sont critiquables en ce sens qu'elles fournissent des résultats très variables des bénéfices de la protection des milieux. L'approche par les fonctions d'impact ou de dommage présente l'inconvénient d'associer bien-être collectif (défini selon la qualité de l'environnement) et bien-être individuel (qui est spécifique à chaque individu). Dans les faits, la puissance publique se limite le plus souvent à imposer une régulation par objectifs, en fixant par exemple des seuils de débit réservés. Les contraintes de prélèvement s'apparentent dans ce cas à des solutions de second rang destinées à garantir aux écosystèmes une ressource suffisante en quantité.

S'agissant des politiques de régulation de la demande agricole, la mise en œuvre des instruments de premier rang (tarification, marché de droits) se heurte aussi à de nombreuses difficultés. En pratique, les systèmes de tarification en place ne sont pas basés sur la valeur marginale de l'eau pour les usagers comme le préconise la théorie économique. De leur côté, les marchés de

11. Des résultats ont été générés sur la base de cette approche. Ils sont présentés dans l'annexe C.1 consacrée à la tarification environnementale.

droits requièrent pour leur bon fonctionnement un système institutionnel administré et une infrastructure adaptée aux transferts géographiques des droits qui sont rarement disponibles. Ainsi, la très grande variété des dispositifs existants s'explique davantage par des problèmes d'implémentation qu'en raison des niveaux des disponibilités et des besoins locaux. En France, l'absence de législation suffisamment précise sur les droits de propriété rend impossible l'instauration des marchés de droits d'eau pour le moment. Les systèmes tarifaires existent mais sans avoir pour but d'inciter à économiser l'eau. La gestion de l'eau est principalement assumée par l'Etat ou par les collectivités territoriales qui pratiquent une régulation quantitative. En période de sécheresse, ce sont les mesures de restriction des usages qui sont privilégiées. On étudiera pour cette raison l'impact d'une interdiction d'arrosage sur les comportements d'usage de la ressource par un agriculteur irrigant dans le chapitre 3. L'identification de sa fonction de demande sera au préalable étudié dans le chapitre 2.

Chapitre 2

Identification de la fonction de demande en eau d'un irrigant

2.1 Introduction

Les politiques de l'eau mises en œuvre par les pouvoirs publics visent à réduire les conflits d'usages et maîtriser les prélèvements. L'irrigation est la principale source de consommation et elle apparaît comme première responsable de la raréfaction de la ressource. La littérature encourage le plus souvent l'adoption de systèmes de tarification pour améliorer la gestion de l'eau. En ce sens, la connaissance du comportement d'usage de l'eau par les agriculteurs est un élément nécessaire à la définition d'une régulation adaptée. L'identification des réponses des irrigants aux prix de l'eau est ainsi indispensable et de nombreux auteurs ont cherché à déterminer des fonctions de demande en eau agricole.

Les travaux de recherche suivent principalement des approches économétriques ou de programmation dynamique. Les approches économétriques dérivent les fonctions de demande à partir de fonctions de profit ou de coût estimées [Ogg and Gollehon, 1989, Moore and Negri, 1992, Moore et al., 1994a, Moore et al., 1994b, Hassine and Thomas, 2001], ou en appliquant des modèles à choix discret¹² [Bar-Shira et al., 2006]. Ces fonctions de demande décrivent ainsi les réactions optimales des exploitants à des variations de prix des facteurs ou des produits. Mais la faible disponibilité des données relatives aux consommations en eau rend cette méthode d'un

12. Cette méthode est spécifique à la tarification par bloc et s'inspire de travaux relatifs à l'impôt progressif [Burtless and Hausman, 1978]. L'approche consiste en une optimisation en deux étapes : dans un premier temps, l'irrigant choisit le niveau optimal de consommation dans chacun des blocs puis, dans un deuxième temps, le bloc lui procurant une utilité maximale.

maniement délicat. L'alternative proposée par la programmation dynamique permet de pallier à ce défaut d'information. Elle consiste à simuler le comportement de l'irrigant et présente l'avantage d'intégrer des modélisations agronomiques, le processus de croissance de la plante ayant le statut d'une fonction de production biologique dont on cherche un maximum sous contraintes. Cette approche a été exploitée pour dériver les fonctions de demande en eau pour différentes cultures [Bernardo et al., 1988, Kulshreshta et al., 1991, Bontemps and Couture, 2002, Scheierling et al., 2003, Bontemps et al., 2004, Conradie and Hoag, 2004, Georgiou et al., 2006].

La relation existante entre l'intensité de l'usage de l'irrigation et le rendement peut être pré-spécifiée par une forme fonctionnelle ou simulée à partir d'un modèle biophysique. Cependant, la fiabilité du processus d'identification de la fonction de demande en eau dépend directement de la spécification sous-jacente du système physique de production. Pour cette raison, les fonctions de production -ou fonctions de réponse à l'eau- pré-spécifiées sont critiquables parce qu'elles sont inadéquates pour décrire l'effet de la répartition intra-annuelle des applications sur l'état physiologique de la plante. L'utilisation d'un simulateur de culture permet au contraire d'appréhender la nature dynamique et stochastique des problèmes agricoles [Oriade and Dillon, 1997]. Les techniques de couplage de modèles agronomique et économique sont pour cela bien adaptées à l'analyse du comportement d'usage de l'eau par les irrigants. Ce type de problème est généralement résolu en appliquant les méthodes traditionnelles de la programmation dynamique, ce qui suppose que les propriétés usuelles de convexité soient vérifiées. Or, la modélisation agronomique intègre les processus intervenant dans la croissance des plantes sans pour autant imposer de postulat sur la forme des correspondances entre les intrants et les rendements simulés. Celle-ci est le résultat de processus complexe (techniques, biologiques et bio-physiques) et ne présente pas à-priori les qualités généralement admises pour l'optimisation.

La question des non-convexités a déjà été discutée en économie agricole et il semble désormais admis que les fonctions de rendement des cultures sont mieux représentées par les formes basées sur l'hypothèse de von Liebig (loi du minimum, non substituabilité des facteurs) que par les formes fonctionnelles traditionnellement utilisées [Paris, 1992, Chambers and Lichtenberg, 1996, Berck et al., 2000]. Les problèmes de non-convexités dus aux propriétés de la croissance des plantes sont par conséquent réels et doivent être pris en considération dans le cadre d'un modèle bio-économique. Notons que des phénomènes de non-convexités ont aussi été mis en évidence en économie de l'environnement concernant les fonctions de dommage [Starret, 1972] ou les relations entre production agricole et effets externes négatifs au niveau d'une exploitation agricole [Flichman and Jacquet, 2003, Flichman and Louhichi, 2008].

Ce chapitre fournit un travail préliminaire à l'étude de la régulation collective de l'eau. Dans le cadre d'un climat continental, celle-ci est difficile à déterminer parce que les demandes en ressource des irrigants sont conditionnées par l'offre naturelle (la pluie). Il importe pour cela de comprendre les règles individuelles de comportement des exploitants avant de considérer de plus grandes échelles. L'objectif est d'appréhender les difficultés induites par le maniement de fonctions de production biologique pouvant présenter des non-convexités locales et de proposer un cadre adapté à l'identification de la demande en eau d'un irrigant. L'analyse se concentre sur la fonction de demande de court terme, à l'échelle d'une campagne d'irrigation. Un cadre déterministe de pluies parfaitement anticipées est considéré¹³. L'objectif n'étant pas de décrire l'impact des mesures gouvernementales sur l'usage de l'eau, aucun élément de politique agricole n'est introduit.

Le chapitre est organisé de la façon suivante. Une première section présente le modèle (2.2). Une deuxième section (2.3) propose une application empirique de ce modèle sur des données du Gers. Les résultats sont exposés à l'échelle d'une parcelle (2.3.2) et d'un territoire (2.3.3). On montre que la fonction de demande est identifiable lorsque l'irrigant est laissé libre de combiner plusieurs itinéraires d'irrigation sur une surface.

13. les difficultés induites par le caractère aléatoire des événements climatiques seront examinées dans le chapitre 4.

2.2 Le modèle

2.2.1 Les stratégies du cultivateur

2.2.1.1 Des choix séquentiels

On étudie sur une saison d'irrigation le comportement d'un cultivateur relatif à l'utilisation d'un périmètre. Une *saison d'irrigation* est un espace de temps sur lequel peuvent s'effectuer des arrosages artificiels de la terre ; elle est divisée en T périodes t . Un *périmètre* est une surface disponible pour une culture donnée et à laquelle correspond un climat et un sol homogène ; il est normalisé à 1.

La destination du périmètre résulte de deux choix séquentiels. Dans un premier temps, le cultivateur choisit l'*état de la terre*.

Definition 1 *L'état de la terre désigne le caractère cultivé ou non cultivé du périmètre. Soit a l'état de la terre, avec $a \in \{0, 1\}$. Le périmètre est cultivé si $a = 1$ et est laissé en jachère si $a = 0$.*

Dans un second temps, le cultivateur choisit un *plan d'irrigation*.

Definition 2 *Un plan d'irrigation est un vecteur de doses d'eau appliquées au périmètre aux différentes périodes de la saison. Soit p_j le plan d'irrigation $j \in \{1, \dots, J\}$, c'est à dire le vecteur $(\omega_{j1}, \dots, \omega_{jt}, \dots, \omega_{jT})$ qui décrit les T doses ω_{jt} apportées aux périodes $t \in \{1, \dots, T\}$. $p_j \in \mathcal{P}$, l'ensemble des plans réalisables. Les J plans réalisables sont regroupés dans la matrice $\Omega(J \times T)$.*

Chaque dose $\omega_{jt} \in D = \{d_1, \dots, d_n, \dots, d_N\}$, l'ensemble fini des doses applicables au périmètre, avec $d_n < \infty$. Ainsi, $J \leq N^T$ par définition. La quantité totale d'eau appliquée par le plan j sur les T périodes est $q_j = \sum_{t=1}^T \omega_{jt}$. Par convention de notation, on définit $d_1 = 0$ et $p_1 = \{(\omega_{1t})_{t=1}^T \mid \omega_{1t} = d_1, \forall t \in \{1, \dots, T\}\}$, le plan pour lequel toutes les doses sont nulles, ce qui implique que $q_1 = 0$. A chaque plan p_j , on associe un rendement y_j . Soit $Y(J \times 1)$ le vecteur d'output. Notons que puisque $p_1 \in \Omega$, une culture "en sec" est possible. En outre, le choix de p_j n'étant pas conditionné par celui de a , un périmètre mis en jachère peut être irrigué ($a = 0$ et $p_j \neq p_1$).

2.2.1.2 Une forme réduite

On propose une expression statique du processus d'allocation de la terre : la destination du périmètre résulte du choix d'une *stratégie* par l'irrigant.

Definition 3 Une stratégie est un choix d'état de la terre **et** d'un plan d'irrigation. Soit s_{aj} la stratégie $(a, p_j) = (a, \omega_{j1}, \dots, \omega_{jt}, \dots, \omega_{jT})$, définie par l'état de la terre a et le plan p_j . L'ensemble des stratégies est $S = \{s_{aj}\}_{\forall a, \forall j}$.

Renormalisation et terminologie On restreint S à l'ensemble $\{\{s_{1j}\}_{\forall j} \cup s_{01}\}$, excluant de ce fait les stratégies consistant à irriguer la jachère. Dans la suite de l'exposé, on désigne par j la stratégie s_{1j} : les stratégies pour lesquelles le périmètre est cultivé sont indicées uniquement par le plan d'irrigation $j = \{1, \dots, J\}$ qui est appliqué. On appelle $J + 1$ la stratégie s_{01} : c'est la stratégie de mise en jachère non irriguée. $j \in \{1, \dots, J\}$ et $J + 1$ sont les $J + 1$ stratégies $j \in S$. S est appelé *ensemble des stratégies* : ceux sont les stratégies "applicables" sur le périmètre.

2.2.2 Le comportement du cultivateur

2.2.2.1 Fonction objectif et contraintes

La fonction d'objectif Le cultivateur distribue les stratégies $j \in \{1, \dots, J + 1\}$ sur le périmètre. Soit γ_j la part de surface sur laquelle la stratégie j est mise en oeuvre. L'objectif de l'agriculteur est de maximiser son profit qui s'écrit :

$$\pi = \sum_{j=1}^J \gamma_j \cdot [py_j - \psi_j - \rho q_j - K^F] - \gamma_{J+1} K^F \quad (2.1)$$

où p est le prix de vente de la culture (en unité monétaire/unité de récolte), ρ celui de l'eau (en unité monétaire/unité de ressource), q_j la quantité d'eau apportée par la stratégie j (en unité de ressource), ψ_j les autres charges de production supportées lorsque la stratégie j est appliquée (en unité monétaire), et K^F les charges foncières fixes (en unité monétaire).

Disponibilité de la ressource en eau Le cultivateur fait face à une contrainte de disponibilité de la ressource sur l'ensemble de la saison. Soit \bar{Q} le quota annuel dont il dispose. $\bar{Q} \in \{Q_1, \dots, Q_k, \dots, Q_K\}$, l'ensemble des K niveaux de quota pouvant être souscrit. La contrainte suppose que la somme des doses appliquées sur les T périodes doit être inférieure au quota, c'est à dire que :

$$\sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j q_j \leq \bar{Q} \quad (2.2)$$

Pour que le problème soit non trivial, on supposera que \bar{Q} est suffisamment grand pour qu'il existe $d_n \in D$ tel que $d_n \leq \bar{Q}$.

Destination du périmètre On a nécessairement :

$$\sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j = 1 \quad (2.3)$$

c'est-à-dire qu'une stratégie est appliquée sur chaque fraction du périmètre. Notons que l'on exclut pas à priori la possibilité de mettre tout ou partie de la terre en jachère, c'est-à-dire une situation dans laquelle $\gamma_{J+1} > 0$ ¹⁴. En outre, une stratégie j ne peut être appliquée que sur une superficie positive ou nulle, soit :

$$\gamma_j \geq 0 \quad (2.4)$$

2.2.2.2 Le problème de contrôle

Programme Soit $\Gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_j, \dots, \gamma_J, \gamma_{J+1})$ la répartition des $J + 1$ stratégies sur le périmètre. C'est la variable de contrôle du cultivateur. On peut alors écrire le problème d'optimisation (P_1) :

$$\max_{\{\gamma_1, \dots, \gamma_J, \gamma_{J+1}\}} \left(\sum_{j=1}^J \gamma_j [py_j - \psi_j - \rho q_j - K^F] - \gamma_{J+1} K^F \right)$$

$$s/c \quad \left\{ \begin{array}{ll} \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j q_j \leq \bar{Q} & (\lambda) \\ \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j = 1 & (\mu) \\ \gamma_j \geq 0 & (\eta_j) \end{array} \right.$$

On appelle (λ) , (μ) et (η_j) les multiplicateurs associés aux contraintes 2.2, 2.3 et 2.4. λ représente la valeur d'une unité supplémentaire de ressource en eau disponible à n'importe quel moment de la saison (valeur marginale du quota) et μ celle d'une unité de surface supplémentaire pour cette saison-là (rente foncière).

14. Lorsque les conditions climatiques sont défavorables, il se peut qu'à l'optimum toute la surface disponible ne soit pas cultivée.

Le lagrangien associé à ce problème est :

$$\mathcal{L} = \sum_{j=1}^J \gamma_j [py_j - \psi_j - \rho q_j - K^F] - \gamma_{J+1} K^F + \lambda \left(\bar{Q} - \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j q_j \right) + \mu \left(1 - \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j \right) + \sum_{j=1}^{J+1} \eta_j \gamma_j$$

Ce qui est équivalent à :

$$\mathcal{L} = \sum_{j=1}^J \gamma_j [py_j - \psi_j - \rho q_j] - K^F + \lambda \left(\bar{Q} - \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j q_j \right) + \mu \left(1 - \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j \right) + \sum_{j=1}^{J+1} \eta_j \gamma_j$$

Un programme optimal d'irrigation doit satisfaire les conditions suivantes :

Condition d'optimalité

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \gamma_j} = 0 \quad \Longrightarrow \quad py_j - \psi_j - \rho q_j - \lambda q_j - \mu + \eta_j = 0$$

D'après les conditions de Kuhn et Tucker, $\gamma_j \eta_j = 0$. Si la stratégie j n'est pas utilisée, $\gamma_j = 0$ et $\eta_j < 0$. Dans ce cas, on a :

$$py_j - \psi_j - \rho q_j < \lambda q_j + \mu \quad (2.5)$$

Si la stratégie j est utilisée, $\gamma_j > 0$ et $\eta_j = 0$. On a alors :

$$py_j - \psi_j - \rho q_j = \lambda q_j + \mu \quad (2.6)$$

Cette condition détermine la fraction γ_j du périmètre allouée à la stratégie j : le cultivateur égalise le profit généré par une stratégie à la valeur de la quantité de ressource qui est appliquée à la terre par cette stratégie-là, augmentée de la rente foncière. En effet, si l'inégalité $py_j - \psi_j - \rho q_j < \lambda q_j + \mu$ était vérifiée, le coût d'opportunité de la stratégie serait supérieur au profit marginal que celle-ci procure. Il conviendrait de diminuer la part de surface qui lui est attribuée. Dans le cas contraire, il conviendrait de l'augmenter.

2.2.2.3 La dimension spatiale

De la parcelle au territoire Le comportement de l'irrigant est décrit à l'échelle d'un périmètre qui est une parcelle ou un territoire. Une *parcelle* est une surface sur laquelle ne peut être appliquée qu'une seule stratégie : c'est une étendue de terre limitée (un champs), laissée en

jachère ou irriguée par un matériel installé pour la saison (pivot par exemple). Un *territoire* est une surface sur laquelle peuvent être appliquées plusieurs stratégies : c'est un secteur de grande superficie (petite région agricole) composé de différentes parcelles aux mêmes caractéristiques pédoclimatiques. En ce sens, le territoire permet une représentation simplifiée de l'hétérogénéité des stratégies mises en oeuvre à une échelle plus grande que celle de la parcelle. En effet, sous certaines contraintes ou conditions météorologiques, un traitement uniforme de cette superficie est inapproprié. En situation de sécheresse ou de forte rareté de la ressource en eau par exemple, le cultivateur ("représentatif"¹⁵) peut préférer associer divers plans plutôt qu'un seul pour irriguer le territoire, voire n'en cultiver qu'une partie et concentrer ses efforts d'irrigation sur une plus faible superficie.

Libre disposition La distribution des stratégies à l'échelle du territoire a été obtenue en généralisant l'approche adoptée dans le cas de la parcelle (on modifie l'espace de distribution de la variable de contrôle). On fait l'hypothèse de *libre disposition*, c'est-à-dire qu'on suppose qu'il n'y a pas de coût spécifique à transférer de la ressource d'une parcelle à une autre. Jachère et plans d'irrigation se répartissent sur le périmètre sans contrainte liée à un équipement fixé (il n'y a pas de coût de déplacement du matériel par exemple).

(P_1) est un problème général adaptable à différentes échelles. Selon les conditions imposées sur l'espace de distribution de la variable de contrôle Γ , il peut correspondre à un modèle d'optimisation de l'irrigation à la parcelle (espace de distribution discret) ou au territoire (espace de distribution continu).

Espace de distribution discret La variable de contrôle du producteur agricole Γ est discrète telle que $\Gamma \subset \Gamma_d = \left\{ (\gamma_j)_{j=1}^{J+1} \mid \sum_j \gamma_j = 1, \gamma_j \in \{0, 1\} \right\}$. Le cultivateur peut choisir d'allouer la *totalité* de la surface soit à de la jachère, soit à une culture non irriguée, soit à une culture irriguée par une *seule* stratégie.

Espace de distribution continu la variable de contrôle du producteur agricole Γ est continue tel que $\Gamma \subset \Gamma_c = \left\{ (\gamma_j)_{j=1}^{J+1} \mid \sum_j \gamma_j = 1, \gamma_j \in [0, 1] \right\}$. Le cultivateur peut choisir de *répartir* la surface entre de la jachère, une culture non irriguée et une culture irriguée par *différentes* stratégies.

15. A l'échelle d'un territoire, le cultivateur peut être vu comme un agent représentatif d'un ensemble d'irrigants répartis dans l'espace.

Nous étudierons la forme des fonctions de profit et de demande pour ces deux cas distincts.

2.2.3 Les décisions optimales du cultivateur

2.2.3.1 Echelle d'une parcelle

On note $\Gamma_d^*(\bar{Q})$, la décision optimale prise par l'irrigant dans un espace de distribution discret pour un niveau de quota \bar{Q} . Notons que le cultivateur ne peut utiliser qu'une seule stratégie pour un niveau de quota donné. Identifier $\Gamma_d^*(\bar{Q})$ revient alors à déterminer la stratégie $j = j_d^*(\bar{Q}) \in S$ qui procure le profit le plus élevé pour un niveau de quota \bar{Q} . $j_d^*(\bar{Q})$ est appelée stratégie optimale. Il peut s'agir d'une stratégie d'irrigation ou de mise en jachère pour la totalité de la surface. C'est le cadre d'analyse traditionnel dans lequel sont étudiés les problèmes d'optimisation de l'irrigation : une parcelle agricole irriguée de façon homogène. Mais la discrétisation peut aussi s'interpréter comme une représentation d'une quantité limitante du facteur capital. La possibilité pour l'exploitant de ne pouvoir apporter au champ qu'un nombre limité de doses d'eau est une modélisation des contraintes de matériel. En ce sens, l'espace de distribution discret est un cadre pertinent pour étudier le comportement d'un exploitant sous-équipé en matériel d'irrigation et ne pouvant pas combiner plusieurs stratégies.

A partir du programme (P_1) et pour chaque quota \bar{Q} , on détermine $j_d^*(\bar{Q})$, $q_d^*(\bar{Q})$ la quantité d'eau appliquée par $j_d^*(\bar{Q})$ et $\pi_d^*(\bar{Q})$ le profit généré par cette stratégie. On en déduit $\lambda_d(\bar{Q})$, le multiplicateur associé à la contrainte de quota. λ_d renseigne la valeur du quota à la marge : c'est la disposition à payer de l'irrigant pour une unité supplémentaire de ressource. Les λ_d pour les différents quotas constituent par conséquent la fonction de demande inverse en eau du cultivateur.

Il est alors possible de représenter les fonctions de profit et de demande en eau pour des conditions économiques et pédoclimatiques données. Cependant, aucune propriété particulière ne peut être formulée sur la forme de ces fonctions : rien n'indique à-priori qu'elles sont conformes aux hypothèses standards de la micro-économie. Les implications sont importantes parce que la validité de la méthodologie repose sur la capacité de l'algorithme à déterminer l'optimum. Or, l'utilisation d'un outil informatique de résolution de programme d'optimisation suppose que les conditions de convexité (ou de stricte quasi-convexité) sont vérifiées. Ce problème sera étudié empiriquement en 2.3.2.

2.2.3.2 Echelle d'un territoire

On caractérise la décision optimale prise par l'irrigant dans un espace de distribution continu pour un niveau de quota \bar{Q} . Puisque la part de surface sur laquelle est appliquée la stratégie j , $\gamma_j \in [0, 1]$ et $\sum_j \gamma_j = 1$, le cultivateur peut choisir de combiner plusieurs stratégies $j \in S$. Il peut s'agir de stratégies d'irrigation ou de mise en jachère pour tout ou partie du périmètre. On introduit ainsi une flexibilité dans l'usage de la ressource, plus réaliste à cette échelle qu'un simple choix entre deux stratégies alternatives. En situation de sécheresse par exemple, où le recours à l'irrigation a un effet déterminant sur le rendement de la culture, un quota d'eau limité appliqué sur une petite surface peut générer une récolte plus abondante que le même quota réparti sur une surface plus étendue si la plus forte productivité de l'eau dans le premier cas compense la perte liée à une surface cultivée réduite. Dans ce cas, l'exploitant agricole peut choisir de concentrer ses efforts d'irrigation sur une partie restreinte du territoire et laisser la superficie restante non irriguée ou en jachère. Pour un environnement pédoclimatique donné et pour différents quotas, il est alors possible de penser qu'il associera plusieurs stratégies plutôt qu'une seule si cela procure un profit plus élevé. C'est un cadre d'analyse nouveau en économie agricole : un périmètre agricole pouvant être partagé entre de la jachère et une culture irriguée de façon hétérogène. Il est important de souligner que cette représentation suppose que l'optimisation de l'usage de l'eau par l'exploitant n'est pas limitée par une contrainte de capital. L'agriculteur dispose d'un matériel suffisant pour allouer la ressource au champ en combinant plusieurs stratégies.

On note $\Gamma_c^*(\bar{Q})$ la décision optimale prise par l'irrigant dans un espace de distribution continu pour un niveau de quota \bar{Q} . $\Gamma^*(\bar{Q}) = (\gamma_1^*, \dots, \gamma_j^*, \dots, \gamma_J^*, \gamma_{J+1}^*)$ est une combinaison optimale de stratégies. L'ensemble des L stratégies $\{j_{c,l}^*(\bar{Q})\}_{l=1}^L$, pour lesquelles les fractions allouées du territoire $\{\gamma_{j_{c,l}^*}^*\}_{l=1}^L$ sont telles que $\gamma_{j_{c,l}^*}^*(\bar{Q}) > 0$ et $\gamma_{j \neq j_{c,l}^*}^*(\bar{Q}) = 0 \forall l$, est noté $J_c^*(\bar{Q})$: ce sont les stratégies associées optimalement qui génèrent le profit maximum réalisable dans un espace de distribution continu pour un niveau de quota \bar{Q} .

A partir du programme (P_1) et pour chaque quota \bar{Q} , on détermine $\Gamma_c^*(\bar{Q})$, $q_c^*(\bar{Q})$, la quantité globale d'eau appliquée selon $\Gamma_c^*(\bar{Q})$ et $\pi_c^*(\bar{Q})$, le profit généré par cette distribution de stratégies. Comme dans un espace de distribution discret, on en déduit $\lambda_c(\bar{Q})$, le multiplicateur associé à la contrainte de quota. Les fonctions de profit et de demande peuvent être représentées pour des conditions pédoclimatiques données. Tant que l'utilisation d'une unité supplémentaire de ressource permet d'accroître le profit, le quota est épuisé et la contrainte saturée : $\lambda_c(\bar{Q}) > 0$. Si la profitabilité marginale de l'eau est nulle, $\lambda_c(\bar{Q}) = 0$.

On a noté en 2.2.3.1 que des problèmes de non convexité peuvent apparaître sur les formes des fonctions de demande. Cela implique que la détermination de la solution optimale globale du problème ne peut pas être garantie par l'usage de méthodes d'optimisation directes. Un moyen de surmonter cet obstacle est de transformer le problème original en un problème convexe. La possibilité de convexifier une fonction en réalisant des combinaisons convexes de différentes valeurs de cette fonction a d'abord été discutée dans l'étude des quasi-cœur des économies monétaires lorsque les préférences sont non convexes [Shapley and Shubik, 1966]. Elle a plus tard été appliquée au principe du maximum [Cheng et al., 1996] et généralisée dans la théorie de relaxation des problèmes variationnels [Hüsseinov, 1997].

On montre deux résultats importants. Premièrement, à l'échelle du territoire, les stratégies combinées à l'optimum pour un quota donné sont des stratégies optimales pour différents quotas à l'échelle de la parcelle (lemme 2). Deuxièmement, la fonction de profit déterminée dans un espace de distribution continu est quasi-concave (proposition 2).

Lemme 1 *A l'optimum dans un espace de distribution continu, l'irrigant ne combine pour un quota donné que des stratégies qui sont optimales pour différents niveaux de quota dans un espace de distribution discret.*

Démonstration du lemme 1 *Soit $\pi_d^*(\bar{Q})$ le profit maximum réalisable dans un espace de distribution discret pour un niveau de quota \bar{Q} :*

$$\pi_d^*(\bar{Q}) = \arg \max \{ \pi_j, j \in S, q_j \leq \bar{Q} \} \in \mathbb{R}$$

Soit $j_d^(\bar{Q})$ la stratégie procurant le profit maximum réalisable dans un espace de distribution discret pour un niveau de quota \bar{Q} :*

$$j_d^*(\bar{Q}) = \{ j / \pi_j = \pi_d^*(\bar{Q}), q_j \leq \bar{Q} \} \in \{1, \dots, J+1\}$$

Soit $\pi_c^(\bar{Q})$ le profit maximum réalisable dans un espace de distribution continu pour un niveau de quota \bar{Q} :*

$$\pi_c^*(\bar{Q}) = \arg \max \left\{ \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j \pi_j, j \in S, \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j = 1, \gamma_j \geq 0, \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j q_j \leq \bar{Q} \right\} \in \mathbb{R}$$

Soit $J_c^*(\bar{Q})$ l'ensemble des stratégies combinées l procurant le profit maximum réalisable dans un espace de distribution continu pour un niveau de quota \bar{Q} :

$$J_c^*(\bar{Q}) = \left\{ l / \sum_{l=1}^L \alpha_l \pi_l = \pi_c^*(\bar{Q}), \alpha_l > 0, \sum_{l=1}^L \alpha_l q_l \leq \bar{Q} \right\} \subset \{1, \dots, J+1\}$$

Soit $\tilde{l} \in J_c^*(\bar{Q})$, une stratégie utilisée à l'optimum par l'irrigant dans un espace de distribution continu pour un niveau de quota \bar{Q} . On veut montrer que nécessairement $\exists \bar{Q} / \tilde{l} = j_d^*(\bar{Q})$.

Supposons $\nexists \bar{Q}$ tel que $\tilde{l} = j_d^*(\bar{Q})$. Alors $\tilde{l} \neq j_d^*(q_{\tilde{l}})$, où $q_{\tilde{l}}$ est la quantité d'eau associée à la stratégie \tilde{l} (ie dans un espace de distribution discret, s'il n'existe pas de quota \bar{Q} pour lequel \tilde{l} procure le profit maximum réalisable, alors \tilde{l} n'est pas la stratégie procurant le profit maximum réalisable pour un quota égal à $q_{\tilde{l}}$).

Par conséquent, $\exists \hat{l} \neq \tilde{l} / \pi_{\hat{l}} = \pi_d^*(q_{\tilde{l}}) > \pi_{\tilde{l}}$ et $q_{\hat{l}} \leq q_{\tilde{l}}$ (ie dans un espace de distribution discret, on peut trouver une stratégie $\hat{l} \neq \tilde{l}$ pour laquelle le profit associé $\pi_{\hat{l}}$ est égal au profit maximum réalisable pour un niveau de quota $q_{\tilde{l}}$ et dont la quantité d'eau associée $q_{\hat{l}} \leq q_{\tilde{l}}$). Dans ce cas, pour un niveau de quota \bar{Q} , le profit maximum réalisable dans un espace de distribution continu en combinant des stratégies $l, \forall l \neq \tilde{l}$, est supérieur au profit maximum réalisable en combinant \tilde{l} à d'autres stratégies.

\implies Contradiction avec l'hypothèse postulant $\tilde{l} \in J_c^*(\bar{Q})$.

Soit Q_k un quota parmi l'ensemble des K niveaux de quota qui peuvent être souscrits. Notons $\pi_k^* = \pi_d^*(Q_k)$ le profit maximum réalisable dans un espace de distribution discret pour un niveau de quota Q_k . Notons $q_k^* = q_d^*(Q_k)$ la quantité d'eau associée à la stratégie $j_d^*(Q_k)$ qui génère le profit π_k^* . On peut énoncer la proposition 1 suivante :

Proposition 1 Dans un espace de distribution continu, (P_1) revient à maximiser la fonction

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k \pi_k^* \tag{2.7}$$

sous les 3 contraintes

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k q_k^* \leq \bar{Q} \tag{2.8}$$

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k = 1 \tag{2.9}$$

$$\alpha_k \geq 0 \quad (2.10)$$

où $\alpha_k \in [0, 1]$ est la fraction du territoire sur laquelle est appliquée la stratégie $j_d^*(Q_k)$.

Démonstration de la proposition 1 Conséquence immédiate du lemme 2.

Le programme auxiliaire (P_2) équivalent au programme (P_1) dans un espace de distribution continu s'écrit alors :

$$\begin{aligned} & \max_{\{\alpha_1, \dots, \alpha_K\}} \sum_{k=1}^K \alpha_k \pi_k^* \\ s/c & \left\{ \begin{array}{ll} \sum_{k=1}^K \alpha_k q_k^* \leq \bar{Q} & (\chi) \\ \sum_k \alpha_k = 1 & (\zeta) \\ \alpha_k \geq 0 & (\nu_k) \end{array} \right. \end{aligned}$$

On appelle (χ) , (ζ) et (ν_k) les multiplicateurs associés aux contraintes 2.8 , 2.9 et 2.10. χ renseigne la valeur du quota à la marge lorsque la ressource est librement applicable à n'importe quelle période de la saison. ζ peut s'interpréter comme la rente foncière, c'est-à-dire la disposition à payer de l'irrigant pour une unité de surface supplémentaire.

Le lagrangien associé à ce problème est :

$$\mathcal{L} = \sum_{k=1}^K \alpha_k \pi_k^* + \chi \left(\bar{Q} - \sum_{k=1}^K \alpha_k q_k^* \right) + \zeta \left(1 - \sum_{k=1}^K \alpha_k \right) + \nu_k \alpha_k$$

Un programme optimal d'irrigation doit satisfaire les conditions suivantes :

Condition d'optimalité

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \alpha_k} = 0 \quad \implies \quad \pi_k^* - \chi q_k^* - \zeta + \nu_k = 0$$

D'après les conditions de Kuhn et Tucker, $\alpha_k \nu_k = 0$. Si la stratégie k est utilisé, $\alpha_k > 0$ et

$\nu_k = 0$. Dans ce cas, on a :

$$\pi_k^* = \chi q_k^* + \zeta \quad (2.11)$$

On trouve des résultats similaires à ceux dérivés dans le programme (P_1) : α_k^* est tel que le profit généré par la stratégie k est égal à la valeur de la quantité de ressource appliquée par cette stratégie, augmentée de la rente foncière. Cette relation doit être vérifiée pour que le coût d'opportunité de la stratégie soit égal à son profit marginal.

Proposition 2 Dans un espace de distribution continu, la fonction de profit de l'irrigant est quasi-concave.

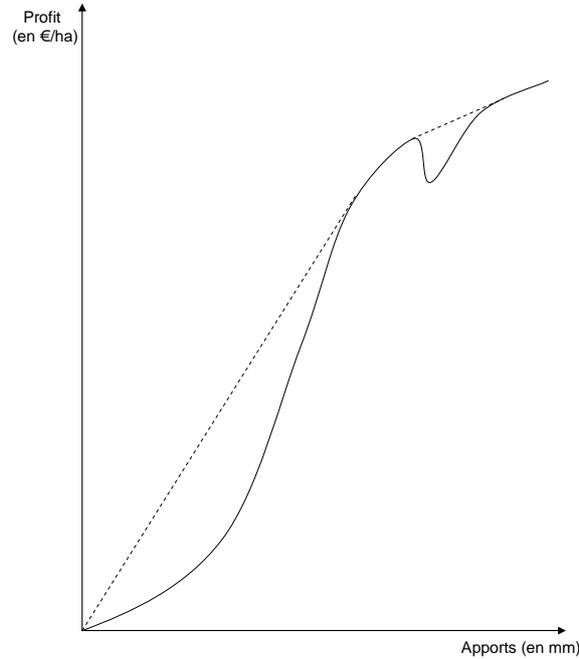


FIGURE 2.1 – Quasi-concavité du profit dans un espace de distribution continu des stratégies

Démonstration de la proposition 2 D'après le lemme 2 et la proposition 1, l'irrigant choisit le vecteur d'allocation $(\alpha_1^*, \dots, \alpha_k^*, \dots, \alpha_K^*)$ si :

1) on a

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k^* \pi_d^*(q_k) \geq \pi_d^* \left(\sum_{k=1}^K \alpha_k^* q_k \right)$$

$$\text{avec } \sum_{k=1}^K \alpha_k^* q_k \leq \bar{Q} \quad \forall \bar{Q}, \quad 0 \leq \alpha_k^* \leq 1 \quad \text{et} \quad \sum_{k=1}^K \alpha_k^* = 1$$

2) $\nexists(\hat{\alpha}_1, \dots, \hat{\alpha}_k, \dots, \hat{\alpha}_K)$ tel que

$$\sum_{k=1}^K \hat{\alpha}_k \pi_d^*(q_k) > \sum_{k=1}^K \alpha_k^* \pi_d^*(q_k)$$

$$\text{avec } \sum_{k=1}^K \hat{\alpha}_k q_k \leq \bar{Q} \quad \forall \bar{Q}, \quad 0 \leq \hat{\alpha}_k \leq 1, \quad \sum_{k=1}^K \hat{\alpha}_k = 1$$

$$\text{et } \sum_{k=1}^K \alpha_k^* q_k \leq \bar{Q} \quad \forall \bar{Q}, \quad 0 \leq \alpha_k^* \leq 1, \quad \sum_{k=1}^K \alpha_k^* = 1$$

Soit $\Pi^c(q)$ la fonction de profit de l'irrigant dans un espace de distribution continu. D'après 1) et 2), $\forall q_1, \forall q_2$ et $\forall t \in [0, 1]$, on a forcément :

$$\Pi^c(tq_1 + (1-t)q_2) \geq t\Pi^c(q_1) + (1-t)\Pi^c(q_2).$$

La décision du cultivateur qui consiste à réaliser des combinaisons linéaires de stratégies optimales revient à convexifier l'ensemble des profits réalisables. Les segments convexes de la fonction de profit sont linéarisés et celle-ci est par conséquent strictement quasi-concave. Les implications sont importantes sur la forme de la fonction de demande en eau. D'après le lemme d'Hotelling, si la demande en un facteur de production $y(\bar{p})$ est monovaluée, alors la fonction de profit $\pi(\cdot)$ est différentiable en \bar{p} et $\nabla \pi(\bar{p}) = y(\bar{p})$ [Mas-Colell et al., 1995]. Ainsi, si $\pi(\cdot)$ présente des non-concavités, $y(p)$ n'est pas identifiable. Sur un segment convexe de la fonction de profit par exemple, la dérivée est positive et la demande par conséquent croissante avec le prix unitaire. Au contraire, si $\pi(\cdot)$ est concave, l'espace des profits réalisables est convexe et les hypothèses standards de la microéconomie vérifiées. C'est un espace "praticable" pour l'algorithme de recherche de l'optimum et la fonction de demande est identifiable.

Les implications économiques du lemme 2 et des propositions 1 et 2 sont importantes. Lorsque l'irrigant n'est pas confronté à une contrainte en facteur autre que celle de la disponibilité en eau, le cadre d'analyse est standard et l'on peut raisonnablement s'attendre à retrouver les effets usuels des politiques de régulation. Par contre, lorsque l'activité d'irrigation est limitée par une contrainte de matériel (cadre d'un espace de distribution discret), le choix de la stratégie implémentée est davantage déterminé par la disponibilité de l'équipement que par l'optimisation de l'usage de l'eau. Dans ce cas, le coût d'opportunité de la contrainte de matériel est supérieur au coût d'opportunité de la ressource. Cela peut avoir des conséquences fortes sur la forme des fonctions de demande et annuler les effets d'une politique de régulation par les prix. La section

2.3 présente des résultats corroborant cette intuition.

2.3 Application empirique

2.3.1 Conception : une procédure en deux étapes

2.3.1.1 Méthodologie

La méthodologie consiste à coupler un simulateur biophysique à un modèle d'optimisation économique. L'approche est "compartimentée", c'est-à-dire que les programmes de simulation et d'optimisation sont deux outils logiciels autonomes, utilisés en complémentarité l'un de l'autre. L'opération s'effectue au moyen d'échange de fichiers générés de façon indépendante par chacune des deux fonctions. La procédure peut être synthétisée par le schéma 2.2.

La mise en application comprend les deux étapes détaillées ci-dessous.

2.3.1.2 Etape 1 : simulation de rendements par un modèle biophysique

Dans une première étape, les rendements d'une culture sont simulés pour différents climats et plans d'irrigation à partir du simulateur agronomique Stics¹⁶. Celui-ci permet de simuler un grand nombre de plans d'irrigation pour un sol, un climat, un type de culture et des techniques donnés [Brisson et al., 2003].

L'intérêt de l'utilisation d'un simulateur agronomique réside dans sa capacité à générer suffisamment de couples (p_j, y_j) pour que la correspondance associant un rendement à tout plan d'irrigation soit identifiable. On aurait certes pu envisager une méthode basée sur l'estimation économétrique de cette relation. Mais cette approche aurait été d'une manière délicate. D'une part parce que les données dont on dispose proviennent de zones en concession combinant des tarifications à des restrictions quantitatives, ce qui complique l'analyse. D'autre part, parce que les consommations individuelles ne sont mesurées que depuis trop récemment pour que l'information soit disponible. En outre, un modèle biophysique présente l'avantage d'isoler l'effet de la variabilité des rendements due au climat et ainsi de mettre en lumière le rôle joué par l'irrigation.

Calibrage de Stics

Le modèle doit être calibré en fixant les valeurs des paramètres concernant le sol, le climat, la plante, les techniques et les plans d'irrigation. Des rendements ont été simulés pour différents

16. Simulateur multIdisciplinaire pour les Cultures Standards.

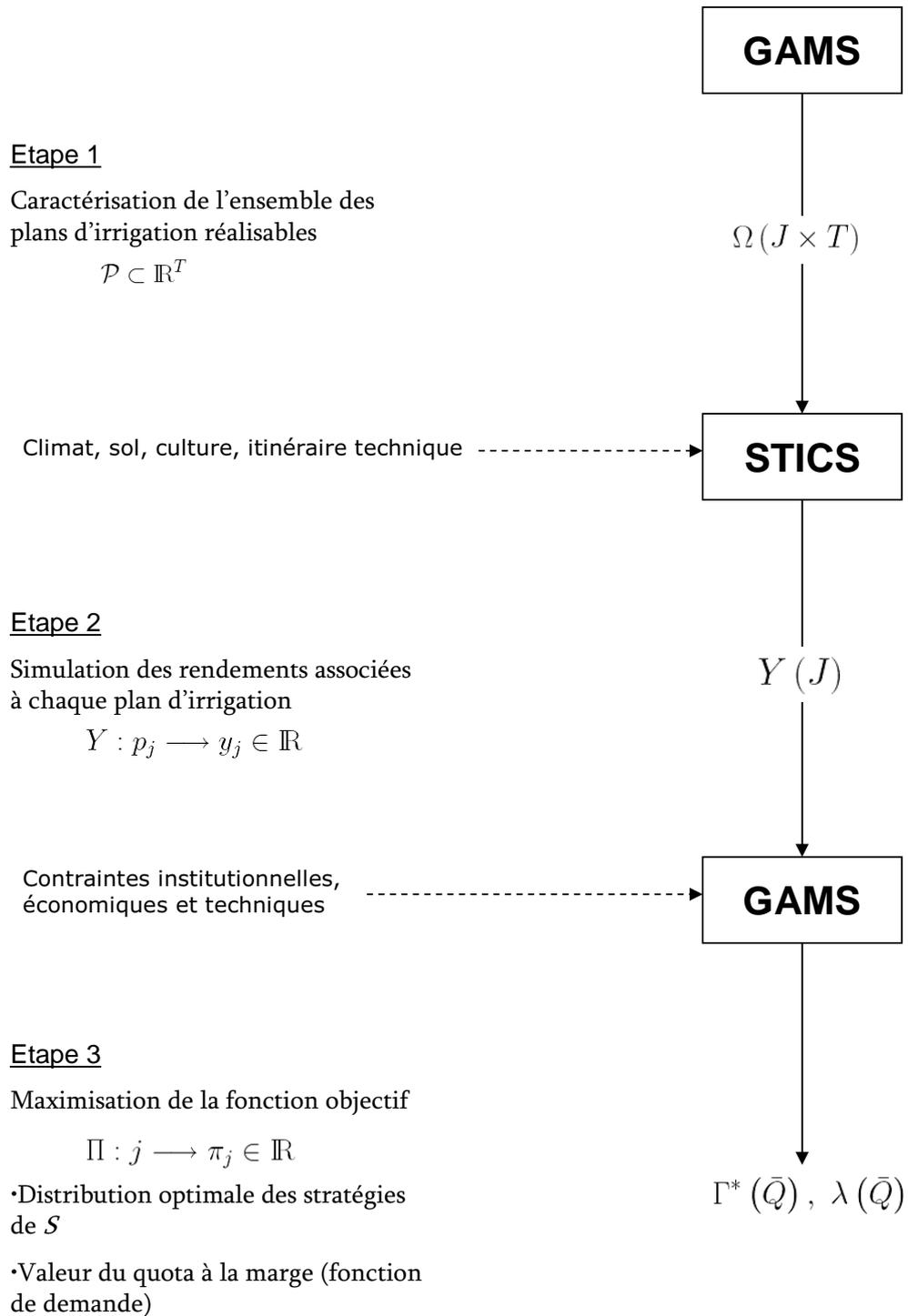


FIGURE 2.2 – Méthodologie de couplage

climats. Les paramètres pédologiques, relatifs à la plante et aux techniques sont les mêmes pour toutes les simulations.

Climat Les conditions météorologiques sont spécifiées dans Stics par 5 séries calendaires (rayonnement, températures minimale et maximale, pluie, évapotranspiration de référence) définies au pas de temps journalier. Nous avons exploité une base de données collectées sur la station de Auch (Gascogne) et mise à notre disposition par le département E&A de l'Inra. Parmi les 29 années (de 1961 à 1990) disponibles, on a considéré 3 scénarios climatiques : une année sèche (1976), une année moyenne (1982) et une année pluvieuse (1988). Les résultats présentés dans le corps de ce chapitre ont été obtenus pour une année sèche. Les annexes B.2.2 et B.2.3 regroupent ceux des années humide et moyenne. L'annexe B.1.2 présente de façon formelle les données climatiques utilisées pour le calibrage du simulateur.

Sol L'environnement pédologique est principalement décrit à partir de données relevées dans la vallée de l'Arratz (CACG, 1965-1968). Ce site est localisé dans un secteur suffisamment proche de la station météo d'Auch pour y admettre un climat identique. Le lieu se caractérise par la prédominance de sols calcaires superficiels de type "terrefort superficiel". Ce sont des sols peu filtrants, de texture argilo-limoneuse avec une granulométrie relativement homogène. Leur teneur en matière organique est relativement élevée avec une bonne fertilité chimique et une profondeur de l'ordre de 90 cm. Les paramètres manquant ont été renseignés par des données d'experts (caractéristiques hydriques et masse volumique des sols en particulier). Une présentation plus formelle du calibrage est disponible en annexe E.7.6.1.

Type de culture Nous avons choisi une culture de maïs "furio". C'est une variété demi-tardive assez ancienne mais dont les stades de développement phénologiques sont similaires à ceux des variétés exploitées localement. La plante se définit par ses stades de développement (stades végétatifs et stades organes récoltés) décrit en degrés-jour. Une présentation formelle des stades de développement de la variété considérée est disponible dans l'annexe B.1.3.

Itinéraire technique Un itinéraire technique "standard" a été défini à partir des pratiques agricoles observées par les agronomes. Les travaux ont été résumés sous la forme d'un "calendrier" des actes techniques effectués tout au long de la saison culturale. Les principaux paramètres renseignés concernent le travail du sol et l'apport des résidus organiques (jour julien des actes, profondeur de travail du sol et d'incorporation des résidus, teneur en azote minéral et proportion

de carbone dans les résidus, quantité de matière fraîche par hectare), le semis (jour julien, densité, profondeur) et la fertilisation (type d’engrais, jours et quantités d’azote minéral apportées, profondeur d’apport, concentration en azote minéral de l’eau d’irrigation). La moisson est réalisée à maturité (endogène). Les plans d’irrigation sont définis ci-dessous. Une présentation formelle des données utilisées pour calibrer l’itinéraire technique sous Stics est disponible dans l’annexe B.1.4.

Plan d’irrigation et rendements associés On considère $T = 15$ périodes et l’ensemble des doses applicables $D = \{0, 30, 60\}$. En limitant à 6 le nombre maximal de doses strictement positives d’un plan p_j apportant sur la saison une quantité globale de ressource $q_j \leq 300$, on dénombre $J = 407312$ plans d’irrigation. Pour chacun des 3 scénarios climatique, les J plans de Ω ont été simulés par Stics. Le résultat de la simulation d’un plan p_j est l’output y_j . Les doses et quantités globales de ressource sont en mm/ha et les niveaux d’outputs en kg/ha. Le détail des périodes considérées est disponible dans le tableau 2.1.

TABLE 2.1 – Périodes d’irrigation

période t	jour julien	jour calendaire
1	140	19 mai
2	148	27 mai
3	156	4 juin
4	164	12 juin
5	172	20 juin
6	180	28 juin
7	188	6 juillet
8	196	14 juillet
9	204	22 juillet
10	212	30 juillet
11	220	7 août
12	228	15 août
13	236	23 août
14	244	31 août
15	252	8 septembre

2.3.1.3 Etape 2 : résolution par optimisation d’un modèle économique

Dans une deuxième étape, à partir de la matrice Ω et du vecteur associé Y fourni par Stics, un programme d’optimisation économique calcule la combinaison de stratégies d’irrigation qui maximise le profit sous la contrainte du quota disponible. Le programme est codé sous le logiciel

Gams [Rosenthal, 2008]. Il intègre les données de l'environnement économique tels que les prix, charges et contraintes réglementaires ou liées à l'état de rareté de la ressource. Les décisions du cultivateur sont donc paramétrées par le scénario pédoclimatique, le prix de vente et les charges de production de la culture, les coûts liés à la consommation d'eau, ainsi que par le niveau de quota. On en déduit le coût d'opportunité du quota. Puis, par simulation, en faisant varier le quota, on reconstitue la fonction de demande implicite en eau (le système de prix d'accès à l'eau équivalent au quota).

Option et calibrage de Gams

Le caractère fortement non linéaire des phénomènes biophysiques suppose de recourir à des méthodes de programmation spécifiques. La résolution est exécutée par Minos, un solveur adapté aux problèmes d'optimisation non linéaire à grande échelle [Murtagh et al., 2006]. Minos utilise un algorithme de gradient réduit associé à un algorithme de quasi-Newton (approximation quasi-newtoniennes).

Il n'existe cependant pas de méthode d'optimisation directe garantissant que la solution optimale soit déterminée si le problème inclut des fonctions non-convexes. Il aurait été possible d'utiliser une méthode stochastique comme la recherche aléatoire mais cette technique n'est appropriée qu'aux petites et moyennes échelles (la probabilité de trouver l'optimum global diminuant avec la taille du problème). De la même façon, les méthodes d'optimisation globale, si elles constituent une alternative fiable, peuvent être très consommatrices de temps. Nous avons montré par la proposition 2 que la fonction de profit de l'agriculteur était quasi-concave dans un espace de distribution continu et que celle-ci pouvait être reconstituée par combinaison linéaire de profits réalisés dans un espace de distribution discret. Nous vérifierons ce processus de convexification. Cette technique est adaptée aux problèmes incluant des variables entières ou discrètes [Pörn et al., 1999] et permet l'usage d'un algorithme comme Minos.

On décrit ci-dessous la calibration du modèle par les paramètres socio-économiques.

Prix et charges (hors irrigation) Une première référence renseigne certains prix et charges sans relation directe avec l'irrigation [Agreste, 2001]. Le prix du maïs payé au producteur p^c est estimé à $0,111\text{€}/kg$ et le montant moyen des charges variables ψ_j à $461\text{€}/ha$ (quel que soit le plan p_j). On intègre dans les charges foncières fixes K^F les loyers, fermages et intérêts sur achats fonciers ($115\text{€}/ha$), ainsi que d'autres biens et services ($248\text{€}/ha$).

Charges d'irrigation Une deuxième référence renseigne les charges liées à la consommation d'eau d'usage agricole [Bertin et al., 2005]. Les coûts de l'eau “sous pression” ρ comprennent la partie variable de la tarification du service ($0,04\text{€}/m^3$), ainsi que la redevance à l'Agence de Bassin ($0,005\text{€}/m^3$).

Quota Le quota \bar{Q} (capacité d'un réservoir ou restriction d'usage quantitative) est un paramètre que l'on fait varier sur un intervalle pour reconstituer les fonctions de profit et de demande en eau.

2.3.2 Résultats à l'échelle d'une parcelle

L'optimisation de l'irrigation à l'échelle de la parcelle est décrite par le problème (P_1) et une distribution des stratégies dans un espace discret, c'est-à-dire tel que la variable de contrôle $\Gamma \in \Gamma_d = \left\{ (\gamma_j)_{j=1}^{J+1} \mid \sum_j \gamma_j = 1, \gamma_j \in \{0,1\} \right\}$. Les résultats exposés dans cette section ont été produits pour une année sèche et un sol argilo-calcaire tel qu'ils ont été présentés précédemment. Les résultats obtenus pour les années moyenne et humide sont fournis dans l'annexe B.

2.3.2.1 Stratégies

La décision optimale du cultivateur consiste dans le choix d'une unique stratégie j pour la totalité de la surface. Si $j = J + 1$, la parcelle est laissée en jachère. Si $j \neq J + 1$, la parcelle est cultivée et une dose d'eau $\omega_{jt} \in \{0, 30, 60\}$ lui est appliquée à chaque date $t \in \{1, \dots, 15\}$. Par conséquent, les quantités “applicables” sont telles que $q_j \in \Delta = \{30z \mid z \leq 10, z \in \mathbb{N}\}$ ¹⁷. Il n'existe pas de stratégie pour lesquelles $q_j \notin \Delta$ et les quotas $\bar{Q} \notin \Delta$ ne peuvent par conséquent pas être épuisés.

Le tableau 1 ci-dessous présente les décisions du cultivateur dans un espace de distribution discret pour différents niveaux de quota en année sèche. \bar{Q} est le quota (en mm/ha), $j_d^*(\bar{Q})$ la stratégie mise en oeuvre sur la parcelle pour un quota \bar{Q} , $q_d^*(\bar{Q})$ la quantité d'eau appliquée par la stratégie $j_d^*(\bar{Q})$ (en mm/ha), $\pi_d^*(\bar{Q})$ le profit généré par la stratégie $j_d^*(\bar{Q})$ (en €/hectare) et $\lambda_d(\bar{Q})$ la valeur du quota à la marge pour l'exploitant (en €/mm).

17. Les plans d'irrigation de la matrice $\Omega(407312, 15)$ sont tels que $q_j \leq 300$ (cf 2.3.1.2).

TABLE 2.2 – Espace de distribution discret

\bar{Q}	q_d^*	j_d^* [cf.†]	π_d^*	λ_d
(mm/ha)	(mm/ha)		(€/ha)	(€/mm)
0	0	407313	-363,00	0
10	0	407313	-363,00	
20	0	407313	-363,00	
30	0	407313	-363,00	0
40	0	407313	-363,00	
50	0	407313	-363,00	
60	60	5745	-296,78	2,21
70	60	5745	-296,78	
80	60	5745	-296,78	
90	90	5956	-192,62	3,47
100	90	5956	-192,62	
110	90	5956	-192,62	
120	120	6021	-48,61	4,80
130	120	6021	-48,61	
140	120	6021	-48,61	
150	150	37789	54,66	3,44
160	150	37789	54,66	
170	150	37789	54,66	
180	180	41916	151,61	3,23
190	180	41916	151,61	
200	180	41916	151,61	
210	210	41949	218,14	2,22
220	210	41949	218,14	
230	210	41949	218,14	
240	240	42971	277,79	1,99
250	240	42971	277,79	
260	240	42971	277,79	
270	270	42980	318,35	1,35
280	270	42980	318,35	
290	270	42980	318,35	
300	270	42980	318,35	0

† Les stratégies sont détaillées dans l'annexe E.7.3.4.

Dans ce contexte économique et pédoclimatique (défini en 2.3.1), les décisions du cultivateur peuvent être classées en 3 groupes principaux :

- Un premier groupe rassemble les décisions prises lorsque $\bar{Q} < 60$. On a $j_d^* = J+1 = 407313$: la parcelle n'est pas cultivée. La stratégie de mise en jachère permet de réaliser une perte de 363€/ha, inférieure à celle d'une culture en sec (464 €/ha) ou irriguée avec un quota de 30 mm (373 €/ha)¹⁸. $\lambda_d(\bar{Q})$ est naturellement égal à zéro puisque la contrainte de quota n'est pas liante.
- Un deuxième groupe rassemble les décisions prises lorsque $60 \leq \bar{Q} < 270$. Le cultivateur opte pour une culture irriguée. Si $\bar{Q} \in \Delta$, la stratégie qui est choisie épuise complète-

18. Le détail des profits générés par une culture en sec ou irriguée à partir d'un quota de 30 mm est disponible dans l'annexe B.2.1.

ment le quota. Par exemple, pour $\bar{Q} = 60$, $j_d^*(60) = 5745$, laquelle procure un profit de $-296,78\text{€}/\text{ha}$; pour $\bar{Q} = 150$, l'irrigant met en place $j_d^*(150) = 37789$ qui génère un profit de $54,66\text{€}/\text{ha}$. En outre, sur cet intervalle, $\lambda_d(\bar{Q}) > 0$: une unité supplémentaire de ressource procure un profit marginal positif (le profit est strictement croissant avec la quantité de ressource apportée).

- Un troisième groupe rassemble les décisions prises lorsque $\bar{Q} \geq 270$. On a $j_d^*(\bar{Q}) = 42980$ avec $q_d^*(\bar{Q}) = q_{42980} = 270$ mm. $\pi_d^*(\bar{Q}) = \pi_{42980} = 318,35\text{€}$, qui est le profit plafond : c'est le profit maximum réalisable lorsqu'il n'y a pas de contrainte de disponibilité de la ressource. Dans ce cas, un apport d'eau plus important sur la saison ne génère pas de profit supplémentaire et naturellement $\lambda_d(\bar{Q}) = 0$.

Notons que le multiplicateur λ_d associé à une contrainte de quota peut aussi s'interpréter comme la productivité marginale de l'eau pour ce quota. Dans le cas présent, on remarque que λ est d'abord croissant avec \bar{Q} sur l'intervalle $0 \leq \bar{Q} \leq 120$ et décroissant ensuite. Ce phénomène suggère que l'espace de distribution discret est un cadre d'analyse inapproprié à l'étude du comportement "standard" des irrigants. En effet, l'hypothèse de rationalité économique de l'agriculteur (il est décrit dans le modèle comme maximisant son profit) et l'intuition que la productivité marginale de l'eau est décroissante auraient dû induire que λ_d soit décroissant avec \bar{Q} : la ressource aurait ainsi été d'abord allouée aux périodes où celle-ci limite le plus le stress hydrique de la plante (c'est-à-dire où la productivité est la plus forte) et ensuite aux périodes moins critiques (c'est-à-dire où la productivité est plus faible).

Par conséquent, un exploitant restreint par son équipement dans ses décisions d'arrosage n'alloue pas efficacement son quota. Sa disposition à payer pour repousser la contrainte de matériel (qui réduit l'ensemble des apports réalisables) est plus forte que sa disposition à payer pour l'eau. Dans ce cas, un système de tarification serait impropre à réguler la demande puisque l'irrigant n'est pas en mesure d'optimiser l'utilisation de la ressource (les choix d'usage de celle-ci sont surdéterminés par la contrainte de matériel).

Ces premiers résultats suggèrent que le développement d'un cadre d'analyse alternatif est nécessaire pour mener une réflexion plus générale sur l'irrigation. Les formes des fonctions de profit et de demande présentées dans les deux sections suivantes confirment cette présomption.

2.3.2.2 Fonction de profit

Le graphe 2.3 expose les profits générés dans un espace de distribution discret en fonction de la quantité d'eau appliquée à la parcelle, dans l'environnement économique et pédoclimatique considéré (cf. section 2.3.1). Le profit en jachère est indiquée par un carré.

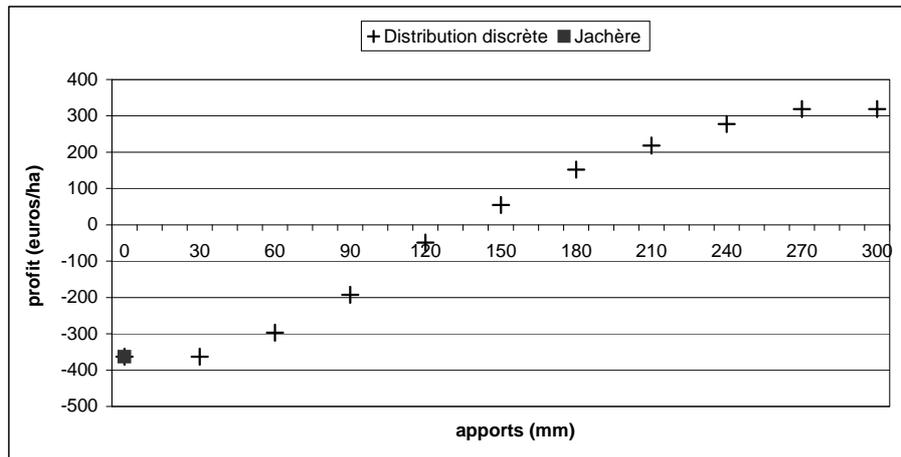


FIGURE 2.3 – Profit à l'échelle d'une parcelle (année sèche)

La fonction présente plusieurs particularités inhabituelles. Premièrement, elle est discontinue. A l'échelle de la parcelle, la discrétisation de Γ réduit l'espace des quantités d'eau applicables : il n'existe pas de stratégies j permettant d'apporter au champ des quantités $q_j \notin \Delta$. Les niveaux de profits atteints sont ainsi limités par les apports de ressource qui peuvent être effectivement réalisés. Deuxièmement, la fonction est d'abord convexe puis concave sur un second intervalle avec un point d'inflexion pour $q_d^*(\bar{Q}) = 120$. Elle n'a donc pas une forme "standard" qui puisse être apparentée à celle des fonctions de profit normalisées usuelles. Sa convexité au départ impliquerait en outre l'existence d'un phénomène de rendement croissant dans l'utilisation de ce facteur.

2.3.2.3 Fonction de demande

Le graphe 2.4 présente la demande en eau en fonction du prix dans un espace de distribution discret (pour le contexte économique et pédoclimatique décrit en 2.3.1). La forme de cette fonction est directement dérivée de la fonction de profit (lemme d'Hotelling) : on a la relation $\nabla \pi_d^*(\bar{Q}) = p_d^*(\bar{Q})$ où $p_d^*(\cdot)$ est la disposition maximale à payer du cultivateur pour une unité de ressource supplémentaire au-delà d'un quota \bar{Q} et $\pi_d^*(\cdot)$ est le profit réalisé pour le quota \bar{Q} . Par conséquent, $p_d^*(\bar{Q})$ est décroissant par rapport au prix sur les segments concaves de la fonction de profit et croissant sur les parties où celle-ci est convexe.

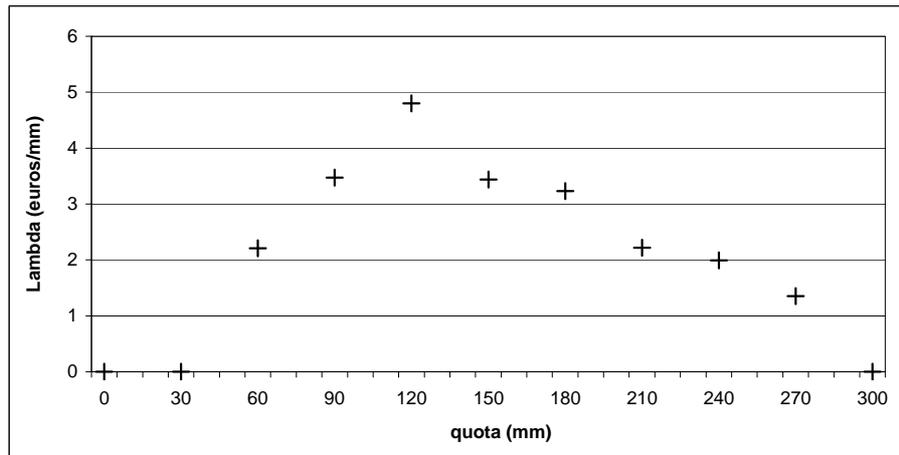


FIGURE 2.4 – Demande à l'échelle d'une parcelle (année sèche)

Le cultivateur n'exploite la surface que s'il dispose d'une quantité d'eau au moins égale à 60 mm. En deçà, la parcelle est mise en jachère. Pour $\bar{Q} = \{0, 30\}$, le profit est donc constant à -363-€ et la demande en eau est nulle. Ensuite, lorsque $\bar{Q} = \{60, 90, 120\}$, la fonction de profit est convexe et la demande en facteur croissante avec le prix. Elle devient décroissante pour $120 < \bar{Q} \leq 270$ (fonction de profit est concave), et est nulle au delà (profits constants pour $\bar{Q} \geq 270$).

2.3.3 Résultats à l'échelle d'un territoire

L'optimisation de l'irrigation à l'échelle du territoire est décrite par le problème (P_1) et une distribution des stratégies dans un espace continu, c'est-à-dire telle que la variable de contrôle $\Gamma \subset \Gamma_c = \left\{ (\gamma_j)_{j=1}^{J+1} \mid \sum_j \gamma_j = 1, \gamma_j \in [0, 1] \right\}$. Les résultats exposés dans cette section ont été produits pour une année sèche et un sol argilo-calcaire (même scénario qu'à la parcelle). Les résultats obtenus pour les années humide et moyenne sont fournis dans les annexes B.2.2 et B.2.3.

2.3.3.1 Stratégies

La décision du cultivateur consiste dans le choix d'une combinaison de stratégies mises en œuvre sur la surface. Le territoire est réparti en parcelles pouvant être cultivées et irriguées, cultivées "en sec" ou laissées en jachère.

Le tableau 2 ci-dessous présente les décisions du cultivateur dans un espace de distribution continu pour différents niveaux de quota en année sèche. \bar{Q} est le quota (en mm/ha), $J_c^*(\bar{Q})$ l'ensemble des stratégies $\left\{ J_{c,l}^*(\bar{Q}) \right\}_{l=1}^L$ employées à l'échelle du territoire pour un quota \bar{Q} , $\gamma_{j_c,l}^*(\bar{Q})$

la fraction du territoire sur laquelle est appliquée la stratégie $j_{c,l}^*(\bar{Q})$, $q_c^*(\bar{Q})$ la quantité totale d'eau apportée par les stratégies de $J_c^*(\bar{Q})$ pondérées par les $\gamma_{j_{c,l}^*}(\bar{Q})$ associés (en mm/ha), $\pi_c^*(\bar{Q})$ le profit généré par les stratégies de $J_c^*(\bar{Q})$ pondérées par les $\gamma_{j_{c,l}^*}(\bar{Q})$ associés (en €/hectare) et λ_c la valeur du quota à la marge pour l'irrigant (en €/mm).

TABLE 2.3 – Espace de distribution continu

\bar{Q}	q_c^*	J_c^* [cf.†]	$\gamma_{j_c^*}$	π_c^*	λ_c
(mm/ha)	(mm/ha)			(€/ha)	(€/mm)
0	0	407313	1	-363,00	2,86
10	10	407313 41916	0,94 0,06	-334,41	2,86
20	20	407313 41916	0,89 0,11	-305,82	2,86
30	30	407313 41916	0,83 0,17	-277,23	2,86
40	40	407313 41916	0,78 0,22	-248,64	2,86
50	50	407313 41916	0,72 0,28	-220,05	2,86
60	60	407313 41916	0,67 0,33	-191,46	2,86
70	70	407313 41916	0,61 0,39	-162,87	2,86
80	80	407313 41916	0,56 0,44	-134,28	2,86
90	90	407313 41916	0,5 0,5	-105,7	2,86
100	100	41916 407313	0,56 0,44	-77,11	2,86
110	110	41916 407313	0,61 0,39	-48,52	2,86
120	120	41916 407313	0,67 0,33	-19,93	2,86
130	130	41916 407313	0,72 0,28	8,66	2,86
140	140	41916 407313	0,78 0,22	37,25	2,86

† Les stratégies sont détaillées dans l'annexe E.7.3.4.

\bar{Q} (mm/ha)	q_c^* (mm/ha)	J_c^* [cf.†]	$\gamma_{j_c}^*$	π_c^* (€/ha)	λ_c (€/mm)
150	150	41916 407313	0,83 0,17	65,84	2,86
160	160	41916 407313	0,89 0,11	94,43	2,86
170	170	41916 407313	0,94 0,06	123,02	2,86
180	180	41916	1	151,61	2,86
190	190	41916 41949	0,67 0,33	173,79	2,22
200	200	41916 41949	0,33 0,67	195,96	2,22
210	210	41949	1	218,14	2,22
220	220	41949 42971	0,67 0,33	238,02	1,99
230	230	41949 42971	0,33 0,67	257,91	1,99
240	240	42971	1	277,79	1,99
250	250	42971 42980	0,67 0,33	291,31	1,35
260	260	42971 42980	0,33 0,67	304,83	1,35
270	270	42980	1	318,35	1,35
280	270	42980	1	318,35	0
290	270	42980	1	318,35	0
300	270	42980	1	318,35	0

† Les stratégies sont détaillées dans l'annexe E.7.3.4.

Dans ce contexte économique et pédoclimatique (défini en 2.3.1), les décisions du cultivateur peuvent être classées en 3 groupes principaux :

- Un premier groupe rassemble les décisions optimales prises lorsque $\bar{Q} < 180$. Le cultivateur choisit de mettre tout ou partie de la surface en jachère. Il n’opte jamais pour la stratégie $j = 1$ qui correspond à une culture “en sec”. Pour un quota nul, $\gamma_{J+1} = \gamma_{407313} = 1$: le profit en jachère (- 363€) étant supérieur à celui d’une culture en sec (-464 €), il lui est préférable de laisser le territoire non cultivé dans son intégralité. Pour $10 \leq \bar{Q} < 180$, $0 < \gamma_{41916} < 1$ et $\gamma_{407313} = 1 - \gamma_{41916}$: l’irrigant applique la stratégie 41916 sur la plus grande superficie permise par le quota (on a $q_c^*(\bar{Q}) = \bar{Q} \forall \bar{Q}$). Par exemple, pour $\bar{Q} = 10$, $\gamma_{41916} = 0,06$ (6% de la surface est irriguée par la stratégie 41916, le reste est laissé en jachère) et $q_c^*(10) = 10$ (tout le quota est utilisé); de la même façon, $\bar{Q} = 170$, $\gamma_{41916} = 0,94$ et $q_c^*(170) = 170$. Le cultivateur réalise des combinaisons linéaires entre la stratégie de mise en jachère et la stratégie d’irrigation 41916. Pour un quota \bar{Q} donné et ce scénario pédoclimatique, aucune autre combinaison ne procure un profit plus élevé (la stratégie 41916 est celle pour laquelle la productivité marginale de l’eau est la plus forte). En outre, l’analyse des λ_c révèle que la disposition marginale à payer pour la ressource est constante : puisque seule la stratégie d’irrigation 41916 est utilisée, la productivité marginale de l’eau est identique pour les différents quotas (l’irrigant égalise sa propension à payer à la productivité économique du facteur). Le profit marginal apporté par une unité de quota supplémentaire ne s’explique pas par l’usage d’une nouvelle stratégie générant un profit plus élevé mais par l’accroissement de la surface irriguée. Le cultivateur préfère saturer la contrainte de ressource foncière plutôt que “d’investir” le quota d’eau marginal dans une autre stratégie associée à un profit moyen -ie par unité de surface- plus élevé mais procurant un profit marginal plus faible.
- Un deuxième groupe rassemble les décisions optimales prises lorsque $180 \leq \bar{Q} < 270$. Pour chaque quota, le cultivateur choisit de cultiver et d’irriguer la totalité du territoire en épuisant le quota : $\sum_j \gamma_{j^*}(\bar{Q}) = 1$ et $\sum_j q_{j^*}(\bar{Q}) = \bar{Q} \forall \bar{Q}$. Il utilise pour cela une seule ou plusieurs stratégies. On observe toutefois qu’il n’en combine jamais plus de deux¹⁹. Les résultats du lemme 1 sont validés : d’une part, si $\pi_c^*(\bar{Q}) = \pi_d^*(\bar{Q})$, alors $J_c^*(\bar{Q}) = j_d^*(\bar{Q})$; d’autre part, si $\pi_c^*(\bar{Q}) > \pi_d^*(\bar{Q})$ alors $J_c^*(\bar{Q}) \subset \{j_d^*(\bar{Q})\}_{\forall \bar{Q}}$. Notons que lorsque le cultivateur associe 2 stratégies pour un quota \bar{Q} , il en combine linéairement une appliquée

19. La proposition 2 implique qu’il est possible d’obtenir le profit maximum réalisable à partir de deux stratégies seulement.

sur l'intégralité du territoire pour un quota $Q < \bar{Q}$ et une autre appliquée sur l'intégralité du territoire pour $Q > \bar{Q}$. Par exemple, seule la stratégie 41916 est appliquée si $\bar{Q} = 180$ ($\gamma_{41916}(180) = 1$) et uniquement la 41949 si $\bar{Q} = 180$ ($\gamma_{41949}(210) = 1$). Pour $180 < \bar{Q} < 210$, le cultivateur combine optimalement ces 2 stratégies selon la disponibilité de la ressource : pour $\bar{Q} = 190$, les 2/3 du périmètre sont irrigués par la stratégie 41916 et 1/3 par la 41949 ; pour $\bar{Q} = 200$, 1/3 du périmètre est irrigué par la stratégie 41916 et 2/3 par la 41949.

- Un troisième groupe rassemble les décisions prises lorsque $\bar{Q} \geq 270$. Le cultivateur irrigue le territoire dans sa totalité avec la stratégie 42980 exclusivement, quel que soit le quota. La quantité maximale d'eau qui est apportée dans l'environnement économique et pédo-climatique que l'on a considéré est donc $q_{42980} = 270$. Une unité marginale de ressource disponible au-delà de cette quantité ne permet pas de générer davantage de profit (mais plutôt des pertes dues aux charges variables d'irrigation) et la propension à payer pour une unité supplémentaire est par conséquent égale à 0 ($\lambda_c = 0$ pour $\bar{Q} > 270$). La stratégie 42980 est la meilleure qui puisse être appliquée sur tout le territoire, c'est-à-dire celle pour laquelle le profit plafond est atteint (318 €).

Les résultats obtenus à l'échelle du territoire (espace de distribution continu) s'avèrent être plus cohérents que ceux obtenus à la parcelle (espace de distribution discret). Premièrement, une variable de contrôle continue tel que $\Gamma \subset \Gamma_c = \left\{ (\gamma_j)_{j=1}^{J+1} \mid \sum_j \gamma_j = 1, \gamma_j \in [0, 1] \right\}$ permet de décrire des comportements rationnels (jachère partielle volontaire, épuisement d'un stock de ressource par combinaisons de stratégies d'irrigation) négligés par les approches classiques. Deuxièmement, les valeurs de λ_c sont décroissantes avec \bar{Q} , ce qui corrobore l'intuition de productivité marginale décroissante du facteur eau. En conséquence, il est raisonnable de penser que l'espace de distribution continu constitue un cadre de travail plus approprié à l'étude du comportement "normalisé" des irrigants (c'est-à-dire lorsque ceux-ci ne sont pas contraints par leur équipement).

2.3.3.2 Fonction de profit

Le graphe 2.5 expose les profits générés dans un espace de distribution continu et rappelle ceux générés dans un espace de distribution discret, en fonction de la quantité d'eau appliquée au territoire, dans l'environnement économique et pédo-climatique considéré (cf. 2.3.1). Les profits réalisés dans un espace de distribution discret sont représentés par des croix et ceux obtenus dans

un espace de distribution continu par une courbe. Le profit en jachère est indiquée par un carré.

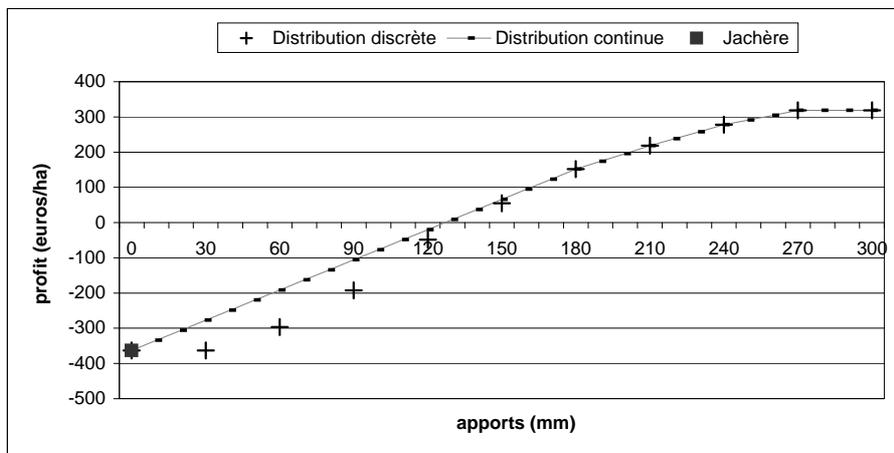


FIGURE 2.5 – Profit à l'échelle d'un territoire (année sèche)

Dans l'espace de distribution continu, la fonction de profit est d'un aspect classique et semble adaptée pour déterminer la demande en facteur. Elle est globalement concave et présente des linéarités sur certaines parties : pour $q_c^*(\bar{Q}) \leq 180$, où elle croît invariablement et lorsque $q_c^*(\bar{Q}) \geq 270$, où elle est constante. Ces particularités s'expliquent aisément par les choix de stratégies du cultivateur. Pour $\bar{Q} = q_c^*(\bar{Q}) \leq 180$ ²⁰, $j = 41916$ est l'unique stratégie d'irrigation qui est appliquée au territoire, dans les limites autorisées par le quota : le profit procuré par une unité d'eau supplémentaire est ainsi le même quel que soit la quantité de ressource apportée. Pour $\bar{Q} \geq 270$, seule la stratégie 42980 est utilisée par l'irrigant, avec $q_{42980} = 270$: un apport marginal de ressource au delà de 270 mm ne procurerait aucun profit. Notons enfin que la fonction est continue. La possibilité de combiner plusieurs stratégies permet d'apporter une infinité de quantités $q_c^*(\bar{Q})$ et d'y associer systématiquement un profit.

L'analyse conjointe des résultats à l'échelle de la parcelle et du territoire révèle que la partie convexe de la fonction déterminée dans un espace de distribution discret est incluse dans le premier intervalle sur lequel la fonction déterminée dans un espace de distribution continu est linéaire (soit $q_c^*(\bar{Q}) < 180$). Lorsque $q_c^*(\bar{Q}) \geq 180$, les profits réalisés dans les deux espaces sont identiques. La possibilité de combiner sur le territoire plusieurs stratégies induit une linéarisation de la fonction de profit caractérisée à la parcelle sur les segments où celle-ci présente des non-concavités. Ainsi, dans un espace de distribution continu, la fonction de profit est nécessairement

20. La relation $\bar{Q} = q_c^*(\bar{Q})$ est vrai pour tous les quotas $\bar{Q} \leq 270$.

concave. Cette propriété est essentielle si l'on souhaite mener une analyse économique robuste et faire un usage pertinent des méthodes informatiques de programmation dynamique. D'une part, l'analyse économique n'est valide que si les hypothèses standards de la microéconomie sont respectées. D'autre part, les algorithmes d'optimisation (Gams/Minos dans le présent cas) supposent que les conditions de convexité soient vérifiées pour que l'optimum soit déterminé sans erreur²¹. En linéarisant la fonction de profit, le processus d'optimisation dans l'espace de distribution continu convexifie l'ensemble des profits réalisables. La fonction de demande en eau est alors identifiable.

2.3.3.3 Fonction de demande

Le graphe 2.6 présente les demandes en eau en fonction du prix déterminées dans les espaces de distribution discret et continu (pour le contexte économique et pédoclimatique décrit en 2.3.1). Rappelons que les formes de ces demandes sont directement dérivées des fonctions de profit par le lemme d'Hotelling tel que $\nabla\pi(q_c^*) = p^*(q_c^*)$ et $p^*(q_c^*)$ décroissant par rapport au prix sur les segments concaves de la fonction de profit et croissant sur ses segments convexes. Les demandes dans un espace de distribution discret sont représentées par des croix et celles dans un espace de distribution continu par une courbe.

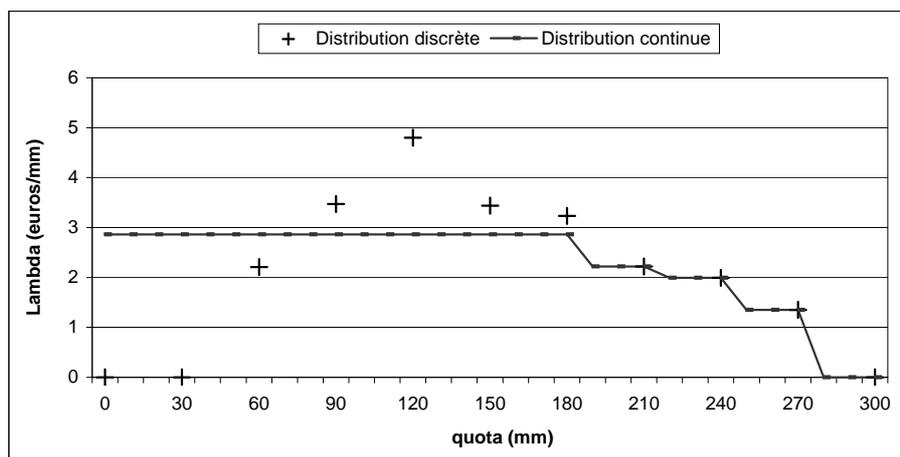


FIGURE 2.6 – Demande à l'échelle d'un territoire (année sèche)

21. MINOS emploie la méthode du gradient (avec des approximations quasi-newtoniennes) pour les modèles linéairement contraints et ceux avec des contraintes non linéaires sont traités par une technique qui résout itérativement des sous problèmes avec des contraintes linéarisées et une fonction objective lagrangienne augmentée. Cet arrangement itératif implique que seule la solution optimale est réalisable pour les modèles non linéaires, à condition que le problème soit convexe.

Dans un espace de distribution continu, la fonction de demande en eau présente une forme plus classique (monotone et décroissante avec le prix) que dans un espace de distribution discret. Premièrement, pour $\bar{Q} \leq 180$, la réalisation de combinaisons linéaires entre la stratégie d'irrigation 41916 et la stratégie de mise en jachère 407313 conduit à linéariser la fonction de profit : la demande en eau est par conséquent constante (2,86-€/mm). Deuxièmement, pour $180 < \bar{Q} \leq 270$, l'effet marginal d'un apport de ressource sur le profit diminue (fonction de profit strictement concave) : la demande en eau est décroissante. Enfin, pour $\bar{Q} > 270$, le plafond des profits réalisables est atteint et la demande en eau est nulle.

L'analyse conjointe des résultats dans les deux espaces de distribution met en lumière les relations existantes entre profit et demande en eau. En comparant les pentes des fonctions de profit dans chaque cas, on peut distinguer le sens des divergences entre les demandes en facteur. Par exemple, lorsque $30 < \bar{Q} \leq 60$, la pente de la fonction de profit dans un espace de distribution discret est moins forte que celle dans un espace de distribution continu : pour $\bar{Q} = 60$, la propension à payer du cultivateur est plus élevée dans l'espace de distribution continu. Par contre, lorsque $60 < \bar{Q} \leq 90$, la pente de la fonction de profit dans un espace de distribution discret est plus forte que celle dans un espace de distribution continu : pour $\bar{Q} = 90$, l'exploitant est naturellement disposé à payer davantage dans l'espace de distribution discret pour avoir accès à la ressource.

Ces résultats sont à rapprocher de ceux qui ont pu être obtenus dans d'autres travaux consacrés à l'estimation de fonctions de demande en eau d'irrigation [Couture, 2000]. Ces fonctions de demande inverses estimées pour divers scénarios climatiques présentaient plusieurs points d'inflexion et pouvaient être découpées en plusieurs zones. Leur tendance générale était également liée à la forme générale de la fonction de profit. Les valeurs des dispositions à payer des irrigants pour la ressource ne sont pas directement comparables parce qu'elles sont spécifiques à des scénarios de prix et à des conditions pédoclimatiques données. Mais les résultats obtenus en 2.3.3.3 sont cohérents avec ceux de la littérature (demande nulle pour des prix allant de 0,1 €/m³ à 0,4 €/m³ selon que l'année soit sèche, moyenne ou humide [Bontemps et al., 2004]).

2.4 Conclusion

Ce chapitre a présenté les conditions sous lesquelles la fonction de demande en eau est identifiable et une méthodologie permettant de l'évaluer. Il a été montré qu'une fonction de demande implicite en eau de l'irrigant peut être correctement reconstituée dans le cas où l'irrigant est laissé libre de combiner plusieurs stratégies d'irrigation sur une surface (échelle du *territoire*). La méthodologie consiste à coupler des modèles biophysique et économique et à mettre à profit la dualité du problème d'optimisation dynamique pour calculer un prix unitaire de l'eau correspondant à des quotas virtuels que l'on fait varier. Cette approche par simulations, qui a été conduite pour une culture, un sol et un climat donné, sera étendue dans le chapitre 4 à des distributions de spéculations, de sols et de climats dans un contexte régional. Ce chapitre est en ce sens un prélude nécessaire à l'analyse des comportements agrégés des irrigants à grande échelle.

Les résultats mis en évidence dans ce travail impliquent que les politiques de l'eau doivent prendre en considération l'ensemble des contraintes de l'agriculteur pour être efficaces. Les contraintes de matériel en particulier, qui déterminent en partie le choix du calendrier d'irrigation, impactent significativement sur la forme des fonctions de demande. En conséquence, une régulation par les prix peut être contre-productive. Les systèmes tarifaires ont été conçus pour des situations où l'eau est l'unique facteur limitant (un exploitant suffisamment bien équipé optimise l'utilisation de l'eau). Mais les irrigants sous-équipés optimisent prioritairement l'utilisation du matériel. Réguler la demande en eau par les prix s'avère dans ce cas sans fondement parce que ce sont les contraintes d'équipement qui déterminent les décisions d'usage de la ressource. Les implications de ce résultat sont importantes. Dans les pays en voie de développement par exemple, l'adoption de système tarifaire est encouragée alors que les exploitations agricoles sont généralement sous-équipées. Il est possible de s'interroger sur la pertinence de cette politique.

La modélisation et le dispositif empirique qui ont été présentés constituent aussi une approche générique adaptable à l'analyse des instruments de gestion. Dans ce domaine, bien que la mise en place de systèmes de tarification est couramment considérée comme la régulation la plus adaptée (du moins dans le cas où les exploitations agricoles sont sur-équipées), l'action des autorités publiques revient généralement à imposer des restrictions quantitatives sur le prélèvement de la ressource. L'étude de l'impact de ce type de mesure sur la demande est l'objet du chapitre 3.

Chapitre 3

Politiques de restriction d'usage de l'irrigation

3.1 Introduction

Les épisodes de sécheresse sont devenus de plus en plus fréquents l'été en Europe et dans d'autres parties du monde. Ces dernières décennies, les déficiences de précipitations associées à des augmentations d'évapotranspiration potentielle ont eu des conséquences particulièrement sévères en Europe centrale et dans les régions méditerranéennes. La France et le Portugal ont été affectés en 1997 [EEA, 2001]. En 1999, une sécheresse "annuelle" a fortement altéré les rendements des cultures en Espagne [Guha-Sapir et al., 2004]. La sécheresse de l'année 2000 en Europe centrale est considérée comme la pire survenue en Chypre ces 30 dernières années, la pire en 50 ans en Roumanie -26000 km² ont été touchés- et la pire en 120 ans en Bosnie et en Herzégovine -on estime que la production agricole a été diminuée de 60% environ [EEA, 2004]. En mai 2002, plusieurs régions italiennes (Sicile, Basilicate, Pouilles, Sardaigne) ont déclaré l'état d'urgence à cause de situations de pénurie d'eau [EEA, 2004]. La sécheresse de 2003 a été révélatrice de la vulnérabilité de l'Europe aux aléas naturels et reste l'un des désastres climatiques les plus coûteux ayant eu lieu sur le continent (les organisations agricoles ont estimé les pertes du secteur à 11 milliards d'euros [COPA-COGECA, 2003]). Des déficits pluviométriques historiques (le niveau des nappes phréatiques ont atteint leur niveau le plus faible depuis 100 ans) combinés avec l'été le plus chaud de ces 240 années (des températures de 4 à 7 °C supérieures à la moyenne) [IES, 2005] ont aggravé les problèmes déjà fréquents de rareté de l'eau. Celle-ci a fait défaut dans la plupart des pays et l'accroissement de la demande pour l'agriculture irriguée a contribué

à détériorer encore davantage les circonstances de la sécheresse [IES, 2005]. L'année 2005 a été particulièrement difficile en Espagne (année la plus sèche enregistrée par l'institut national de la météorologie depuis 1947), au Portugal (perte de 60% de la production de blé, chute de 80% des rendements du maïs) et en France (récoltes de maïs 20% plus faibles qu'en 2004) [WWF, 2006]. En 2006, la sécheresse a affecté l'essentiel des régions d'Espagne et du Portugal et une grande partie de l'Italie et de la France [WWF, 2006].

L'objet de ce chapitre est d'évaluer l'impact d'une restriction temporaire de l'irrigation sur la valeur d'un quota d'eau annuel. Dans la plus plupart des régions du monde, l'agriculture est le principal usage de l'eau et est considérée comme le premier responsable des pénuries lorsque survient une sécheresse. Les décideurs publics ont à leur disposition une variété d'instruments décentralisés (cf. le travail réalisé sur la tarification dans l'annexe C.1) pour gérer la rareté de la ressource. Mais les mécanismes de prix nécessitent d'être correctement définis pour être efficaces et les systèmes existants ne sont pas aptes à établir des tarifs flexibles dans le temps. En situation de crise où toutes les demandes ne peuvent pas être satisfaites, la priorité est généralement donnée à l'eau potable : en Espagne, la loi sur l'eau (1995) instaure un classement des usages par ordre d'importance (l'approvisionnement des villes tout d'abord, suivi par l'irrigation et la production d'électricité pour l'industrie) [Costejà et al., 2002]; en Italie, la loi Galli (1994) prévoit des mesures pour satisfaire en premier lieu les usages domestiques [Smets, 2006]; en France, la loi sur l'eau (1992) donne aussi la priorité à l'alimentation en eau potable [JO, 1992]. Les pouvoirs publics se conforment à ces recommandations légales à l'aide de dispositifs d'urgence : ils recourent le plus souvent à des instruments centralisés très administrés qui prennent la forme de contraintes provisoires imposées sur l'utilisation agricole de l'eau. Cependant, et bien qu'il s'agisse d'une mesure régulièrement mise en œuvre, un nombre relativement limité d'articles ont cherché à évaluer l'impact économique d'une suspension de l'irrigation. Des auteurs ont étudié la valeur de la ressource pour deux usages alternatifs (l'irrigation et l'hydroélectricité) en estimant les pertes de revenu causées par des rationnements de l'offre. Les résultats indiquent qu'un marché de droits permettrait de réaliser efficacement des transferts d'eau de l'agriculture vers la production d'hydroélectricité parce que la valeur marginale de la ressource y est plus élevée [Hamilton et al., 1987]. Dans le même esprit, des estimations de valeurs d'options pour un usage provisoire de l'eau d'irrigation ont suggéré que des contrats d'option passés entre les municipalités du Colorado et les agriculteurs permettraient les années sèches d'alimenter les villes à un prix plus faible que le coût d'achat de droits d'eau pour une quantité équivalente de ressource [Michelsen and Young, 1993]. Il a également été montré que la disposition à recevoir des exploi-

tants texans pour participer à un programme de suspension de l'irrigation dépend du moment auquel celui-ci est annoncé : antérieurement à la saison culturale (lorsque les choix de cultures et d'assolement peuvent encore être ajustés), ils sont prêts à s'associer au programme en échange d'une compensation de 90 dollars par acres ; après le début de la saison, les auteurs prédisent que des indemnités plus élevées doivent leur être versées [Keplinger et al., 1998]. Plusieurs articles se sont intéressés à la valeur de l'eau d'usage agricole à différentes périodes dans le temps. Des modèles de programmation linéaire et de programmation dynamique ont été développés pour optimiser l'allocation de l'eau entre des cultures et des parcelles alternatives : ceux-ci ont permis de déterminer les itinéraires d'irrigation qui maximisent le profit en réponse au prix fictif de la ressource [Yaron and Dinar, 1982]. Le risque a été introduit dans d'autres travaux qui ont cherché à évaluer les prix optimaux de l'eau aux différentes périodes dans divers contextes informationnels : des résultats pour le sud du bassin Murray-Darling (Australie) montrent que la valeur que les agriculteurs lui accordent en environnement risqué peut être quatre fois supérieure à celle qu'ils lui attribuent en environnement déterministe [Beare et al., 1998]. On trouve aussi des estimations de la valeur de l'irrigation obtenues en appliquant la méthode des prix hédonistes aux ventes de terre [Faux and Perry, 1999].

Ce chapitre propose une approche originale pour évaluer l'effet d'une restriction de l'irrigation sur la valeur et la fonction de demande en eau. La méthode consiste à coupler un modèle de simulation de croissance d'une plante avec un modèle non linéaire d'optimisation économique. Les rendements d'une culture de maïs ont été simulés pour un grand nombre d'itinéraires d'irrigation (407312) et un processus d'optimisation a ensuite été appliqué sur cette relation (itinéraire d'irrigation/rendement). L'objectif de la procédure est de mettre à profit la dualité du problème d'optimisation dynamique pour évaluer le coût d'opportunité de la ressource. Ce problème n'est pas trivial parce que les contraintes institutionnelles (allocation de quotas d'eau, prohibitions de l'irrigation) et les processus biophysiques (croissance des cultures, dynamique de l'eau dans le sol) doivent être pris en compte de manière simultanée.

La section 3.2 décrit le dispositif français de restriction des usages agricoles de l'eau. Le modèle est présenté dans la section 3.3. La section 3.4 propose une application de ce modèle. Les résultats sont exposés dans la section 3.5. Il est montré empiriquement que l'impact d'une interdiction d'arrosage sur la valeur de l'eau est variable (il peut être positif ou négatif) selon l'amplitude et la date à laquelle celle-ci est mise en place. Deux effets opposés ont été identifiés : un effet de rationnement et un effet de gaspillage. Le modèle est capable de déterminer lequel des deux est dominant.

3.2 Le dispositif français

Un procédé de conservation de l'état écologique des cours d'eau consisterait à contrôler le plus finement possible les prélèvements qui y sont effectués. Mais une telle organisation nécessiterait des moyens lourds impossible à mettre en œuvre en pratique. De leur côté, les politiques de tarifications sont elles aussi souvent difficiles à établir et à faire fonctionner correctement. A cause de cela, les pouvoirs publics se bornent souvent à allouer des quotas annuels, inadaptés pour réguler précisément la consommation d'eau à certain moment de la campagne. Il est certes possible de lisser les retraits de ressource en limitant les débits de prélèvement autorisés qui sont attribués à chacun des exploitants; mais ceux-ci sont généralement souscrits de manière uniforme sur la saison et sans qu'il ne soit envisageable de les renégocier en cas d'étiage critique de la rivière. Cette incapacité des instruments à réguler la demande ont conduit les gestionnaires à élaborer des systèmes approchés plus adaptés aux particularités du monde réel : en parallèle des gestions "courantes" (répartition des disponibilités globales par attribution de quotas) sont mis en place des gestions "de crise" (interdiction temporaire de l'irrigation²²). La combinaison de ces deux instruments permet ainsi de rationner la ressource à différentes échelles de temps ; c'est une alternative réalisable à d'autres mécanismes d'allocation parfois difficiles à mettre en place.

Les mesures de suspension ou de limitation des usages de l'eau sont présentées dans le décret n° 92-1041 du 24 septembre 1992 qui précise les modalités de mise en oeuvre de l'article L.211-3 II-1° du code de l'environnement, introduit par la loi sur l'eau du 3 janvier 1992. Cependant, le cadre réglementaire prévu par ce décret reste très général : il stipule simplement que pour répondre à des situations de crise sur la ressource, des mesures "*générales ou particulières*" peuvent être prescrites par arrêté du préfet "*pour faire face à une menace ou aux conséquences d'accidents, de sécheresse, d'inondations ou à un risque de pénurie*". La circulaire du 15 octobre 1992 commente l'application du décret du 24 septembre 1992 en préconisant une hiérarchisation des besoins entre les différents usages (maintient d'un débit minimum et alimentation en eau potable). Mais ce n'est que dans le cadre du plan d'action sécheresse 2004, faisant suite à la sécheresse de 2003 et exposé aux préfets de bassin²³ dans la circulaire du 30 mars 2004, qu'a été prévu l'élaboration d'un guide des prescriptions types à destination des préfetures. Celui-ci est développé dans la circulaire du

22. Le respect d'une interdiction d'irriguer présente l'avantage d'être plus facilement "vérifiable" que celui d'une interdiction de prélèvement.

23. Le préfet de bassin "*anime et coordonne l'action des préfets des départements et des régions appartenant au bassin*" (cf. décret du 27 mai 2005).

15 mars 2005, aussi appelée “*Mesures exceptionnelles de limitation ou de suspension des usages de l’eau en période de sécheresse : guide méthodologique*” et est présenté dans le paragraphe suivant.

Le document rappelle les principes directeurs (“*Les mesures prises par le préfet en période de sécheresse doivent être progressives, appropriées au but recherché, suffisantes eu égard à la gravité de la situation, et ne peuvent être prescrites que pour une période limitée*”) et définit le contenu des arrêtés cadre, qui décrivent à l’avance les règles et les seuils de déclenchement des restrictions à appliquer en période d’étiage. L’objectif est de faire face à la pénurie en préservant les usages prioritaires (eau potable en particulier). Le guide préconise pour cela que les mesures de limitation anticipent l’évolution des ressources en étant suffisamment précoces ; les arrêtés cadre spécifient en ce sens des “*seuils de crise*” qui indiquent le moment adéquat pour rendre effectives les mesures. La démarche consiste pour les eaux de surface à réduire l’impact des retraits en limitant les quantités prélevées instantanément. Pour lisser le débit de la rivière en évitant que trop d’irrigants n’arrosent au même moment, le guide recommande “*d’organiser un tour d’eau sur une durée donnée -la semaine permet aux agriculteurs de planifier leurs périodes d’irrigation-, lors duquel ils sont autorisés à prélever*”.

En pratique, les préfetures définissent 3 niveaux de débit²⁴ :

- Le **seuil d’alerte** correspond au débit au dessous duquel sont assurés la coexistence de tous les usages et le bon fonctionnement du milieu aquatique. Le franchissement de ce seuil déclenche une procédure de limitation des prélèvements 3,5 jours/semaine ou à 50% du débit autorisé.
- Le **seuil de crise** est un seuil intermédiaire destiné à limiter progressivement les prélèvements afin de ne pas atteindre le niveau de crise renforcé. Le franchissement de ce seuil déclenche une procédure de limitation des prélèvements 2 jours/semaine ou à 30% du débit autorisé.
- Le **niveau de crise renforcé** correspond à la valeur en dessous de laquelle sont mis en péril l’alimentation en eau potable et la survie des espèces présentes dans le milieu. Le franchissement de ce seuil déclenche une procédure d’interdiction totale des prélèvements.

Notons toutefois que si ces mesures types ont pour objectif d’homogénéiser à l’échelle nationale les dispositions pouvant être prises en situation d’étiage, la gestion déconcentrée au niveau des préfets de département et la concertation avec les usagers sont la règle. La gravité des phénomènes

24. On n’énonce que les mesures relatives au cours d’eau, qui sont celles qui nous intéressent dans le cadre de ce travail.

de sécheresse est appréciée très variablement d'un bassin à un autre (selon l'abondance de la ressource, la géologie et la climatologie du lieu, la pression de la consommation) et les restrictions doivent être adaptées aux enjeux locaux.

Le modèle présenté ci-après est destiné à déterminer l'effet des mesures prohibant l'irrigation sur les stratégies des exploitants, le profit agricole et la valorisation du stock de la ressource et de son flux aux diverses périodes de la saison.

3.3 Le modèle

L'objet n'est pas de proposer un modèle normatif destiné à déterminer une politique de gestion de la ressource efficiente et réalisable en situation de coopération imparfaite des irrigants. L'étude se focalise exclusivement sur l'emploi de l'eau à des fins agricoles et les bénéfices environnementaux retirés d'une éventuelle restriction ne sont pas pris en compte. Les interdictions d'usage de l'irrigation peuvent par exemple être destinées à empêcher qu'un débit trop faible dans une rivière soit nuisible au milieu. La fonction d'objectif maximisée dans le problème de contrôle ne comprend cependant que le profit généré par l'agriculture (non corrigé des coûts écologiques de prélèvements excessifs). On souhaite simplement identifier les modifications de comportement de l'agriculteur en réaction aux mesures prohibant l'irrigation et évaluer leurs effets sur le surplus agricole. L'impact d'un arrêté d'interdiction sur la valorisation économique du quota (échelle de la saison) ou de la disponibilité de la ressource dans le temps (échelle d'une période) présente également un intérêt.

3.3.1 Un problème dynamique

Les problèmes d'allocation optimale de l'eau d'usage agricole sont typiquement dynamique. A chaque période, les prix fictifs associés aux contraintes sont affectés par les doses d'eau de l'itinéraire d'irrigation mis en place par l'agriculteur. Les processus biophysiques et les politiques de gestion de la ressource résultent en des interactions économiques complexes qui influent le comportement des exploitants.

Processus biologique

La croissance d'une plante ne dépend pas uniquement de la somme des doses d'eau qui lui sont appliquées mais aussi du timing de ces applications. La saison culturale n'est pas constituée d'une succession de périodes statiques indépendantes parce que les processus biologiques (croissance

des plantes) impliquent de fortes interdépendances entre chacune d'entre elles. Par conséquent, l'itinéraire d'irrigation choisi par l'agriculteur est le résultat d'un processus de décision non-markovien. La dose optimale d'eau à apporter à une période t dépend d'abord des événements climatiques passés et des doses d'eau appliquées à la culture jusqu'à cette date : la contribution au profit de l'usage de l'irrigation est contingente aux caractéristiques agronomiques de la plante qui résultent de son "histoire biologique" (stress hydriques passés en particulier). Mais l'opportunité d'apporter une dose donnée à une période donnée est également fonction des événements climatiques futurs et des apports programmés pour les périodes suivantes.

Processus physiques

Lorsque le flux d'eau applicable au champ est contraint par les capacités de l'équipement (taille des tuyaux des arroseurs par exemple²⁵), l'agriculteur peut avoir intérêt à prendre des mesures préventives pour se prémunir des stress hydriques futurs. Le plus souvent, il avance sa campagne d'irrigation dans le but de se couvrir contre le risque d'un déficit hydrique provoqué par un taux d'humidité trop faible d'un sol qui n'a pas pu être rempli assez rapidement. Dans ce cas, il est effectivement approprié d'irriguer et de remplir le réservoir même si la valeur "instantanée" de la ressource est égale à zéro -puisque la croissance de la culture n'est limitée par aucun stress à ce moment-là-, plutôt que d'économiser l'eau pour les périodes suivantes. Cependant, si l'irrigation débute trop tôt ou est trop abondante, il existe un risque de drainage dû à une capacité au champ limitée. En ce sens, la dynamique de l'eau dans le sol joue un rôle déterminant dans le processus de prise de décision de l'agriculteur. Il est pour cela important d'intégrer le fonctionnement physique du sol (mécanismes de transfert de l'eau d'une couche à une autre) dans le cadre d'un travail empirique.

Implications d'une restriction de l'irrigation

Les contraintes institutionnelles comme les interdictions provisoires d'arrosage peuvent conduire l'agriculteur à intensifier ou réduire son effort d'irrigation. D'un côté, les périodes non contraintes peuvent être utilisées pour contrebalancer l'effet de la restriction sur les périodes contraintes : il est possible de préserver partiellement le rendement de la culture en amplifiant les applications d'eau avant et après la régulation. D'un autre côté, l'activité physiologique des plantes est durablement modifiée si leurs besoins en eau ne sont pas satisfait (au cours des périodes contraintes), ce qui réduit la valeur de l'eau. Les conséquences des stress hydriques sont en effet irréversibles et le

25. Dans l'application empirique, la dose d'eau maximale pouvant être apportée à chaque période a été limitée à 60 mm/ha.

rendement de la culture est dans tous les cas -c'est à dire quel que soit l'itinéraire d'irrigation mis en œuvre- plus faible que dans la situation non régulée. Par exemple, si l'impact de la restriction sur l'état agronomique de la plante est de nature à rendre les bénéfices de l'irrigation plus faibles que ses coûts, il est optimal de ne pas irriguer (la valeur de l'eau est alors égale à zéro).

3.3.2 L'autorité publique et l'irrigant individuel

3.3.2.1 Le rôle de l'autorité publique

On considère le cas d'un gestionnaire de la ressource soucieux de préserver le milieu aquatique d'un étiage trop prononcé du cours d'eau mais ne disposant pas d'instrument adéquat pour réguler efficacement la consommation agricole. D'une part parce que la mise en place d'une tarification engendrerait des coûts de transaction et d'administration trop élevés pour être envisageable ; d'autre part parce que les dispositifs centralisés comme l'attribution de quotas par période sont exposés aux problèmes d'aléa moral inhérents à ce type de système²⁶. Dans ce contexte, il choisit d'appliquer une gestion quantitative de second rang consistant à interdire l'usage de l'irrigation dès que la protection des écosystèmes l'exige. Cette disposition réglementaire est un cas particulier des mécanismes complexes d'octroi de quota-période non reportable qui correspond à l'attribution d'un quota nul aux périodes auxquelles est appliquée la restriction.

Interdiction de l'irrigation L'autorité publique a le pouvoir d'ordonner l'arrêt de l'irrigation à n'importe quel moment de la saison. Une telle disposition réglementaire est introduite dans le programme d'optimisation de l'agriculteur en contraignant à zéro les apports en ressource aux périodes couvertes par la restriction. On désigne par t^d et t^f les périodes de début et de fin de l'interdiction. Une irrigation nulle sur l'intervalle $[t^d, t^f]$ s'écrit :

$$\sum_{j=1}^J \sum_{t=t^d}^{t^f} \omega_{jt} = 0 \quad (3.1)$$

où ω_{jt} est la quantité d'eau appliquée par la stratégie j à la période t (en unité de ressource). On suppose en outre qu'il n'est possible de prendre qu'un seul arrêté par an.

L'objectif est d'étudier l'impact de cette politique sur la réallocation du quota de ressource sur l'ensemble de la campagne. Il importe pour cela d'isoler le problème de reprogrammation optimale du calendrier d'irrigation des effets induits par l'aversion au risque. La modélisation du

26. La lutte contre la fraude supposerait de réaliser des investissements en mesures de contrôle très coûteux.

comportement de l'exploitant face aux aléas préfectoral et climatique rendrait difficile l'identification des mécanismes d'anticipation de l'agriculteur. Par conséquent, l'analyse est conduite dans le cadre d'un univers déterministe, les phénomènes naturels (pluies, températures) et les décisions des autorités publiques (c'est-à-dire les restrictions d'usage de l'eau) étant parfaitement anticipés. Les aspects aléatoires de la gestion de l'eau seront introduits dans le chapitre 4.

Remarque 1 *L'hypothèse d'un univers déterministe peut paraître forte parce que le climat est par nature une variable aléatoire et que les phénomènes météorologiques ne peuvent pas être connus ex ante. Ainsi, il serait possible de penser que l'éventualité que soient mises en place des dispositions en réponse à un déficit hydrique soit difficile à évaluer au début de la saison. Cependant, l'irrigant dispose également d'informations acquises au cours du temps pour apprécier la probabilité de mesures restrictives. Les précipitations réalisées ou l'état des "stocks" (eau souterraine ou de surface) sont des bons indicateurs de rareté de la ressource. Les signaux envoyés par les décideurs publics (sensibilisation face au gapillage par exemple) ou certains membres de la société civile (associations pro-environnementale ou de consommateurs) sont d'autres éléments qui annoncent une limitation vraisemblable de l'irrigation. Le cultivateur possède aussi sa propre expérience des campagnes passées et à accès aux recommandations et avertissements des organisations et syndicats agricoles.*

3.3.2.2 Le programme de l'irrigant individuel

On considère un agriculteur cultivant une surface et équipé pour l'irrigation. Pour assurer les besoins en eau de la culture, il réalise des prélèvements dans la rivière dans la limite du quota global \bar{Q} qu'il a souscrit et est soumis à l'interdiction d'usage de l'irrigation spécifiée par l'équation 3.1.

Le problème de contrôle

Fonction d'objectif La fonction d'objectif est le profit de l'agriculteur qui s'écrit :

$$\pi = \sum_{j=1}^J \gamma_j [py_j - \psi_j - \rho q_j - K^F] - \gamma_{J+1} K^F \quad (3.2)$$

C'est la même fonction que celle décrite au chapitre 2 . On rappelle que p est le prix de vente de la culture (en unité monétaire/unité de récolte), ρ celui de l'eau (en unité monétaire/unité

de ressource), y_j le rendement généré par la stratégie j , $q_j = \sum_{t=1}^T \omega_{jt}$ la quantité totale d'eau apportée par la stratégie j sur les T périodes (en unité de ressource), ψ_j les autres charges de production supportées lorsque la stratégie j est appliquée (en unité monétaire), et K^F les charges foncières fixes (en unité monétaire).

Contraintes Outre la contrainte d'interdiction, trois contraintes usuelles sont spécifiées.

Premièrement,

$$\sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j q_j \leq \bar{Q} \quad (3.3)$$

l'irrigant dispose d'un quota d'eau annuel \bar{Q} où $\bar{Q} \in \{Q_1, \dots, Q_k, \dots, Q_K\}$, l'ensemble des K niveaux de quotas pouvant être souscrit.

Deuxièmement,

$$\sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j = 1 \quad (3.4)$$

une stratégie est appliquée sur chaque fraction du périmètre.

Troisièmement,

$$\gamma_j \geq 0 \quad (3.5)$$

une stratégie j ne peut être appliquée que sur une superficie positive ou nulle.

Programme L'agriculteur choisit la distribution des stratégies $\gamma = (\gamma_1, \dots, \gamma_j, \dots, \gamma_J, \gamma_{J+1})$ satisfaisant les contraintes (3.1), (3.3), (3.4), (3.5) et qui maximise son profit représenté par l'équation (3.2). Le problème d'optimisation (P) s'écrit :

$$\max_{\{\gamma_1, \dots, \gamma_J, \gamma_{J+1}\}} \left(\sum_{j=1}^J \gamma_j [py_j - \psi_j - \rho q_j - K^F] - \gamma_{J+1} K^F \right)$$

$$s/c \quad \left\{ \begin{array}{ll} \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j q_j \leq \bar{Q} & (\lambda) \\ \sum_{t=t^d}^{t^f} \omega_{jt} = 0 & (\varrho) \\ \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j = 1 & (\mu) \\ \gamma_j \geq 0 & (\eta_j) \end{array} \right.$$

(λ) , (ϱ) , (μ) et (η_j) sont les multiplicateurs associés aux contraintes (3.1), (3.3), (3.4) et (3.5) : (λ) est la rente de rareté du quota \bar{Q} , (ϱ) la rente de rareté associée à l'interdiction d'irriguer²⁷ entre les périodes t^d et t^f et (μ) la rente de rareté de la terre.

Notons que l'utilisation d'une fonction de coût linéaire ne limite pas la portée générale de la formulation (P). La convexification induite par la combinaison de différentes stratégies (l'espace de distribution est continu) permet de recouvrir des fonctions de coût plus complexes. Une formulation équivalente aurait consisté à adopter une structure de coût sophistiquée (fonction croissante et convexe par exemple) associée à une définition plus élémentaire des stratégies de l'agriculteur. La dualité du problème est ainsi mise à profit pour s'accommoder du relatif défaut de données disponibles sur les charges d'exploitation des activités agricoles (les bases existantes les expriment en euros par hectare).

3.3.3 Conditions d'optimalité

Le lagrangien associé à ce problème est :

$$\mathcal{L} = \sum_{j=1}^J \gamma_j [py_j - \psi_j - \rho q_j] - K^F + \lambda \left(\bar{Q} - \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j q_j \right) - \varrho \left(\sum_{t=t^d}^{t^f} \omega_{jt} \right) + \mu \left(1 - \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j \right) + \sum_{j=1}^{J+1} \eta_j \gamma_j$$

27. Si la rente de rareté du quota est nulle ($\lambda = 0$), ϱ peut l'interpréter comme la disposition à payer de l'irriguant pour une unité supplémentaire de ressource disponible sur l'intervalle $[t^d, t^f]$.

Un programme optimal d'irrigation doit satisfaire les conditions suivantes :

Condition d'optimalité

$$\frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \gamma_j} = 0 \quad \implies \quad py_j - \psi_j - \rho q_j - \lambda q_j - \mu + \eta_j = 0$$

D'après les conditions de Kuhn et Tucker, $\gamma_j \eta_j = 0$. Si la stratégie j est utilisée, $\gamma_j > 0$ et $\eta_j = 0$. On a alors :

$$py_j - \psi_j - \rho q_j = \lambda q_j + \mu$$

Interprétation

On retrouve la relation 2.6 dérivée en 2.2.2.2. L'agriculteur égalise le profit généré par une stratégie à la valeur de la quantité de ressource que celle-ci apporte au champ, augmentée de la rente foncière. Cette condition détermine la fraction γ_j du périmètre allouée à la stratégie j .

3.4 Application empirique

3.4.1 Contexte climatique

La procédure d'identification de la fonction de demande et d'évaluation de la valeur de l'eau a été appliquée à partir de données provenant du secteur des Baïses (Gers). C'est une région au climat océanique mais caractérisé par une forte influence méditerranéenne durant l'été. Le territoire est principalement agricole. Les exploitants y cultivent notamment du maïs de manière intensive (70% de la surface cultivée est irriguée) et l'agriculture est pour cela le principal consommateur de ressource en eau (2/3 du total) [Cemagref and Cacg, 2005]. Des conflits surviennent fréquemment avec les autres usages (municipaux ou industriels) lorsqu'une pénurie apparaît [Bertin et al., 2005]. Une régulation équilibrée de l'eau pour les usages agricoles a certes été mise en place s'agissant des prélèvements dans les rivières mais les pompages en nappes phréatiques ne sont pas observables et coûteux à mesurer. En situation de rareté critique de la ressource, les autorités publiques donnent la priorité à l'alimentation en eau potable et prennent des mesures légales visant à prohiber l'irrigation.

Historique des sécheresses sur le territoire

Les sécheresses étaient considérées comme des événements exceptionnels jusqu'aux années 1990 mais sont aujourd'hui devenues récurrentes et de plus en plus fréquentes depuis le début des

années 2000. Durant l'été 2003, les ruisseaux et rivières du système hydrographique des Baïses ont fait partie des plus affectés par la vague de chaleur [Bertin et al., 2005]. Au mois d'août, les précipitations ont atteints un niveau historiquement bas et les mesures de restriction n'ont pas permis de limiter leurs impacts sur les débits des cours d'eau. De septembre 2004 à septembre 2005, le déficit pluviométrique a été d'environ 70% par rapport à la moyenne des chutes de pluies mesurées les cinquante années précédentes et les rendements en maïs en 2005 ont été 20% plus faible qu'en 2004 [Amigues et al., 2006]. En janvier 2006, le niveau des nappes phréatiques à l'échelle nationale était si bas (baisse des précipitations à l'automne 2005 de l'ordre de 50%) que la Ministre de l'Environnement Nelly Olin informa le monde agricole que l'année 2006 se préparait à être une année de sécheresse record en France; ces avertissements s'adressaient plus particulièrement aux agriculteurs engagés dans le processus de choix des cultures d'été. Le désastre climatique annoncé n'a finalement pas eu lieu mais 2006 a cependant été une année difficile pour les irrigants. En 2007, un printemps très pluvieux a permis d'éviter de mettre en œuvre les mesures de restriction envisagées dès la fin de l'hiver. Mais les alertes ministérielles en période de semis sont désormais systématiques et les objectifs de réduction de consommation d'eau clairement affichés [OIEau, 2007].

3.4.2 Cadre d'analyse

3.4.2.1 Calibrage du modèle

On décrit tout d'abord l'environnement pédoclimatique du milieu, les choix de culture et les techniques agricoles adoptées par l'exploitant (paramétrage de Stics); on expose ensuite les données de l'environnement économique (paramétrage de Gams).

Paramétrage de Stics

Paramètres pédoclimatiques Les caractéristiques du climat et du sol sont identiques à celles définies dans le chapitre 3 : les rendements pour trois scénarios climatiques (1976, 1982 et 1988) ont été simulés sur un sol peu filtrant de texture argilo-limoneuse, de type "terrefort superficiel".

Type de culture et itinéraire technique Ces paramètres sont identiques à ceux présentés dans le chapitre 3 : un calendrier "standard" définit les pratiques de culture d'un maïs tardif.

Plans d'irrigation On considère $T = 15$ périodes et l'ensemble des doses applicables $D = \{0, 60\}$. En limitant à 6 le nombre maximal de doses strictement positives d'un plan p_j apportant sur la saison une quantité globale de ressource $q_j \leq 300$, on dénombre $J = 9949$ plans d'irrigation.

Paramétrage de Gams

Prix et charges Les paramètres de prix et charges sont les mêmes que ceux définis au chapitre 3 : ψ_j est fixé à 461 €/ha, p à 0,111 €/ha, K^F à 363 €/ha et α à 0,045 €/m³.

3.4.2.2 Caractéristiques de la régulation

Les pouvoirs publics adoptent une gestion de crise sous la forme d'interdictions temporaires d'usage de l'irrigation²⁸. Dans le cadre d'une politique d'allocation de quotas par unité de temps (garanti à l'échelle d'une période), cela correspond au cas limite d'un quota nul sur une ou plusieurs périodes. Notons que rien n'indique à priori que l'intervalle "d'interdiction" choisi par le régulateur soit celui qui est économiquement optimal. L'irrigation est mécaniquement proscrite par les autorités administratives lorsque la pénurie d'eau atteint un seuil critique prédéfini (seule la contrainte environnementale est prise en compte). Du point de vue de l'agriculteur, la situation idéale consiste évidemment à ce qu'aucune disposition de ce type ne soit prise. L'optimum économique se situe entre l'optimum écologique et l'optimum du point de vue de l'agriculteur.

On suppose que la lourdeur des procédures administratives visant à prohiber l'irrigation conduit le régulateur (préfet dans ce cas) à ne l'interdire qu'une seule fois dans l'année. Les conséquences de la restriction sur le comportement et les performances optimales de l'agriculteur ne sont examinées que pour des intervalles d'interdiction de deux périodes consécutives. On appelle "phases d'arrêt" ces intervalles-là.

Remarque 2 *Les suspensions des usages agricoles de l'eau simulées dans ce travail sont des représentations élémentaires des dispositifs parfois complexes appliqués par les autorités préfectorales. Réduire la mise en œuvre de "tours d'eau" à des interdictions totales de l'irrigation peut sembler être une simplification excessive. Mais dans certaines configurations, l'agriculteur peut avoir effectivement intérêt à réduire ou supprimer ses apports sur une partie du périmètre pour concentrer les prélèvements d'eau autorisés sur une surface plus réduite. D'autre part, on ne*

²⁸. Le respect d'une interdiction d'usage est supposé plus facilement observable que celui d'une interdiction de prélèvement.

cherche pas ici à produire des résultats précis sur les effets d'une restriction particulière mais à en illustrer l'impact sur le comportement et la valorisation du stock et du débit de ressource par l'exploitant. Ces phénomènes-là apparaissent plus nettement pour des phases d'arrêt de l'irrigation assez étendues.

Phase d'arrêt On considère les 14 "phases d'arrêt" suivantes qui sont les intervalles de temps sur lesquels les conséquences d'une interdiction de l'irrigation ont été étudiées (tableau 3.1) :

TABLE 3.1 – Descriptif des phases d'arrêt

Phase d'arrêt	Intervalle d'interdiction	Périodes* contraintes	Phase d'arrêt	Intervalle d'interdiction	Périodes* contraintes
1	- 31/05	1 et 2	8	10/07 - 26/07	8 et 9
2	23/05 - 08/06	2 et 3	9	18/07 - 03/08	9 et 10
3	31/05 - 16/06	3 et 4	10	26/07 - 11/08	10 et 11
4	08/06 - 24/06	4 et 5	11	03/08 - 19/08	11 et 12
5	16/06 - 02/07	5 et 6	12	11/08 - 27/08	12 et 13
6	24/06 - 10/07	6 et 7	13	19/08 - 04/10	13 et 14
7	02/07 - 18/07	7 et 8	14	27/10 -	14 et 15

* La proscription des arrosages durant les phases d'arrêt a été formalisée en contraignant à zéro les apports en eau effectués à ces périodes-là.

L'objet de cette étude est d'évaluer l'effet de ces dispositions réglementaires sur le profit réalisé et la valorisation de la ressource par l'exploitant (à l'échelle de la campagne ou d'une période). Les modifications de la répartition intra-annuelle du quota d'eau disponible (nouvelle combinaison optimale de stratégies) sont aussi analysées.

3.5 Résultats

3.5.1 Situation de référence : le cas non régulé

Le chapitre 3 a présenté les résultats dans un espace de distribution discret (i.e. tel que $\gamma \in \Gamma_d = \left\{ (\gamma_j)_{j=1}^{J+1} \mid \sum_j \gamma_j = 1, \gamma_j \in \{0, 1\} \right\}$) et dans un espace de distribution continu (i.e. tel que $\gamma \in \Gamma_c = \left\{ (\gamma_j)_{j=1}^{J+1} \mid \sum_j \gamma_j = 1, \gamma_j \in [0, 1] \right\}$) obtenus à partir d'un ensemble de $J+1 = 407313$ stratégies. Le cadre d'analyse est celui d'un espace de distribution continu. Or, il a été montré qu' à l'optimum dans un espace de distribution continu, l'irrigant ne combine pour un quota donné que des stratégies qui sont optimales pour différents niveaux de quota dans un espace de distribution discret (lemme 1). Les solutions numériques du chapitre 3 confirment qu'un très petit

nombre de stratégies sont utilisées par l'agriculteur parmi l'ensemble des stratégies possibles. Il est dès lors possible de restreindre la dimension de la matrice des plans d'irrigation Ω sans que la pertinence des résultats ne soit affectée.

On considère ici $J = 9949$ plans d'irrigation uniquement (générés selon les contraintes définies dans le paragraphe *Paramétrage de Stics*). Les $J + 1 = 9950$ stratégies d'irrigation ont été simulés dans l'environnement économique, technique, institutionnel et pédoclimatique qui a été présenté ci-dessus. Lorsque aucune régulation n'est mise en place, on a les résultats détaillés dans le tableau 3.2 (profits générés, valeurs de la ressource et distributions de stratégies choisies par l'irriguant pour chaque niveau de quota).

Il est possible de représenter graphiquement les doses d'eau apportées à la culture aux différentes périodes de la saison. Pour chacun des quotas $\bar{Q} = 100$, $\bar{Q} = 200$ et $\bar{Q} = 300$, l'allocation intra-annuelle réalisée par l'agriculteur est la suivante :

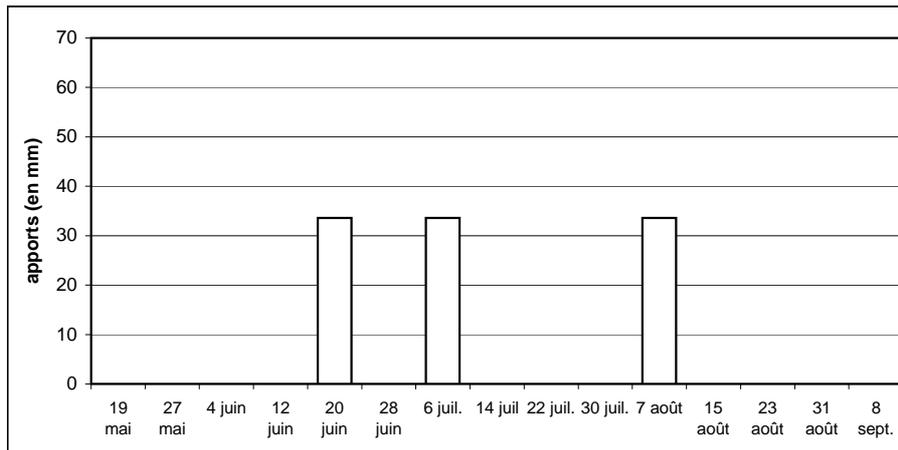


FIGURE 3.1 – Allocation intra-annuelle pour un quota $\bar{Q} = 100$ (aucune régulation)

3.5.2 Réallocation intra-annuelle de la ressource

Les conséquences de chaque phase d'arrêt sur le profit et les distributions de stratégies sont présentées dans le cas d'un quota $\bar{Q} = 200$ (tableau 3.3).

On rappelle qu'à l'optimum et dans un espace de distribution continu²⁹ q^{c*} est la quantité d'eau consommée (en mm/ha), J^{c*} l'ensemble des stratégies utilisés par l'agriculteur, $\gamma_{J^{c*}}$ la distribution de ces stratégies sur le périmètre, Π_c^* le profit réalisé (en €/ha). λ_c est la valeur du quota à la marge (en €/ha) et ϖ la disposition à payer de l'irriguant pour avoir marginalement

29. L'astérisque indique que l'on raisonne à l'optimum et la lettre "c" en indice ou en exposant que l'on se situe dans un espace de distribution continu.

TABLE 3.2 – Situation de référence (pas de régulation)

Q	q^{c*}	J^{c*}	γ_j^{c*}	π_c^*	λ_c
(mm/ha)	(mm/ha)	[cf. †]		(€/ha)	(€/mm)
0	0	9950	1	-363	2,72
10	10	1084	0,06	-335,75	2,72
20	20	1084	0,11	-308,51	2,72
30	30	1084	0,17	-281,26	2,72
40	40	1084	0,22	-254,02	2,72
50	50	1084	0,28	-226,77	2,72
60	60	1084	0,33	-199,53	2,72
70	70	1084	0,39	-172,28	2,72
80	80	1084	0,44	-145,04	2,72
90	90	1084	0,5	-117,79	2,72
100	100	1084	0,56	-90,55	2,72
110	110	1084	0,61	-63,3	2,72
120	120	1084	0,67	-36,06	2,72
130	130	1084	0,72	-8,81	2,72
140	140	1084	0,78	18,43	2,72
150	150	1084	0,83	45,68	2,72
160	160	1084	0,89	72,92	2,72
170	170	1084	0,94	100,17	2,72
180	180	1084	1	127,41	2,72
190	190	1084	0,83	151,51	2,41
		1193	0,17		

† Les stratégies sont détaillées dans l'annexe C.3.1.

\bar{Q}	q^{c*}	J^{c*} [cf.†]	γ_j^{c*}	π_c^*	λ_c
(mm/ha)	(mm/ha)			(€/ha)	(€/mm)
200	200	1084 1193	0,67 0,33	175,61	2,41
210	210	1084 1193	0,5 0,5	199,71	2,41
220	220	1084 1193	0,33 0,67	223,82	2,41
230	230	1084 1193	0,17 0,83	247,92	2,41
240	240	1193	1	272,02	0,72
250	250	1193 1204	0,83 0,17	279,23	0,72
260	260	1193 1204	0,67 0,33	286,44	0,72
270	270	1193 1204	0,5 0,5	293,65	0,72
280	280	1193 1204	0,33 0,67	300,86	0,72
290	290	1193 1204	0,17 0,83	308,07	0,72
300	300	1204	1	315,28	0

† Les stratégies sont détaillées dans l'annexe C.3.1.

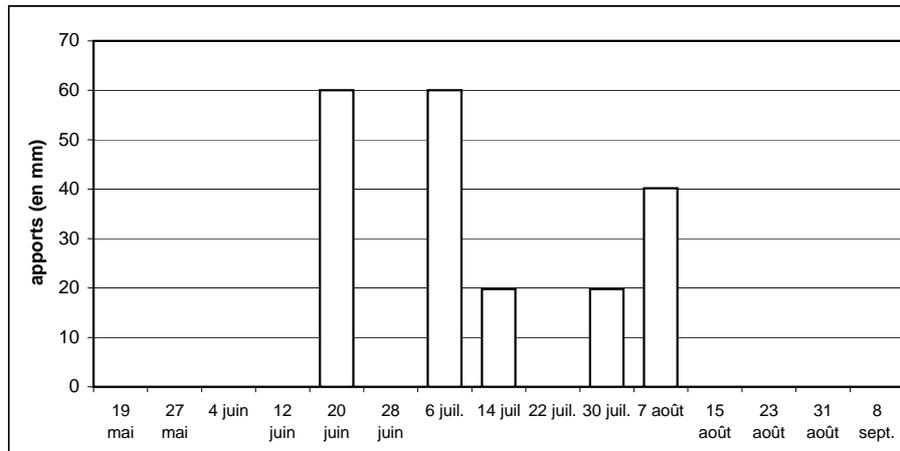


FIGURE 3.2 – Allocation intra-annuelle pour un quota $\bar{Q} = 200$ (aucune régulation)

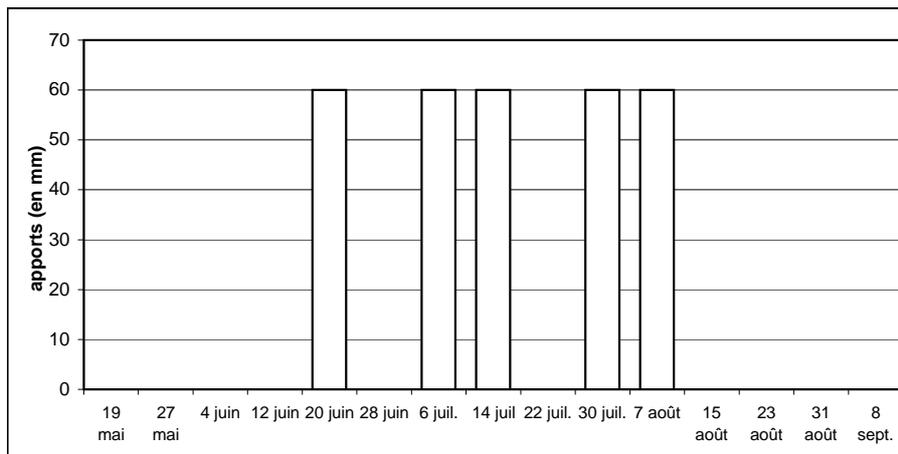


FIGURE 3.3 – Allocation intra-annuelle pour un quota $\bar{Q} = 300$ (aucune régulation)

accès à la ressource durant la phase d'arrêt (en €/mm).

TABLE 3.3 – Interdictions de l'irrigation avec $\bar{Q} = 200$

Phase	q^{c*}	J^{c*}	$\gamma_{J^{c*}}$	Π_c^*	λ_c	ϖ
d'arrêt	(mm/ha)	[cf. †]		(€/ha)	(€/ha)	(€/mm)
1	200	1084 1193	0,67 0,33	175,61	2,41	0,00
2	200	1084 1193	0,67 0,33	175,61	2,41	0,00
3	200	1084 1193	0,67 0,33	175,61	2,41	0,00
4	200	384 769	0,67 0,33	159,19	2,29	0,18
5	200	384 414	0,67 0,33	153,67	2,01	0,46
6	200	1052	0,83	153,60	2,58	0,30
7	200	546 576	0,67 0,33	152,71	2,01	0,49
8	200	1084 1114	0,67 0,33	168,88	2,07	0,31
9	200	1084 1182	0,67 0,33	171,65	2,21	0,10
10	200	1167 1175	0,67 0,33	153,41	1,77	0,70
11	200	1167 1193	0,67 0,33	169,32	2,57	0,20
12	200	1084 1193	0,67 0,33	175,61	2,41	0,00
13	200	1084 1193	0,67 0,33	175,61	2,41	0,00
14	200	1084 1193	0,67 0,33	175,61	2,41	0,00

† Les stratégies sont détaillées dans l'annexe C.3.1.

Les résultats du tableau 3.3 permettent de déterminer la répartition sur la campagne des disponibilités en ressource lorsqu'une interdiction de l'irrigation est imposée sur un intervalle donné. On ne représente en figure 3.5 que l'allocation réalisée pour des arrosages prohibés entre le 8 et le 24 juin (phase d'arrêt 4 ou contraintes d'apport nuls aux périodes 4 et 5). Les histogrammes relatifs aux phases d'arrêt 7 et 10 (du 2 au 18 juillet et du 26 juillet au 11 août) sont disponibles en annexe C.2. La figure 3.4 ci-dessous correspond au cadre de référence exposé en 3.5.1.

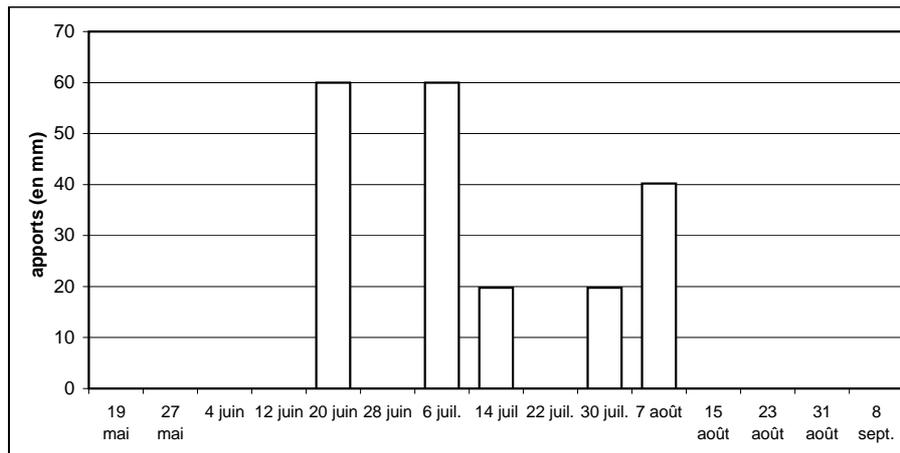


FIGURE 3.4 – Allocation sans restriction ($\bar{Q} = 200$ mm)

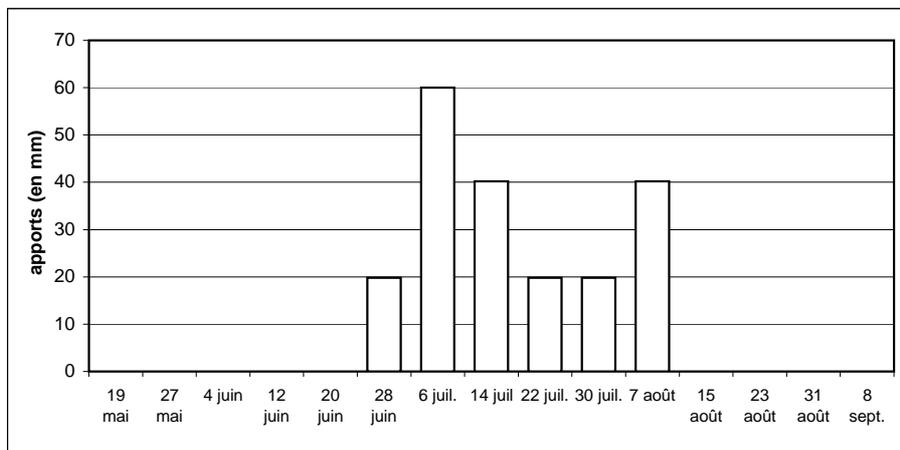


FIGURE 3.5 – Allocation avec une interdiction d'arrosage aux périodes 4 et 5 ($\bar{Q} = 200$ mm)

La limitation dans le temps de l'usage de l'irrigation conduit l'exploitant à redistribuer la totalité des disponibilités en eau sur les sous-intervalles temporels non contraints. Il ne se borne pas à répartir les apports initialement affectés aux périodes prohibés sur les autres périodes de la saison : la nouvelle allocation est le résultat d'un processus de ré-optimisation de l'emploi du quota global conditionnellement à la restriction. Ce résultat est une application du principe de

Le Chatelier³⁰, connu de la littérature concernant l'analyse de la demande avec rationnement [Samuelson, 1947]. Il explicite les nouvelles possibilités de substitution entre les périodes non contraintes dans une situation où les autres paramètres seraient optimaux.

Notons que dans le cadre de cet exemple, la régulation peut permettre de faire face à une pénurie temporaire de la ressource mais pas de réduire les prélèvements globaux dans la rivière (l'irrigant épuise le quota $\bar{Q} = 200$ malgré l'interdiction).

3.5.3 Impact de la restriction sur la valorisation de l'eau

Modification de la fonction de demande

Considérons à titre d'exemple une interdiction de l'irrigation mise en place entre le 24/06 et le 10/07 (phase d'arrêt 6). Le tableau 3.4 renseigne la valeur à la marge de chaque quota dans ce cas-là, en parallèle de celle calculée en situation non régulée (d'après le tableau 3.2).

TABLE 3.4 – Impact d'une restriction sur la valorisation du quota

\bar{Q}	λ (en €/mm)		\bar{Q}	λ (en €/mm)	
	Aucune régulation	Interdiction phase 6		Aucune régulation	Interdiction phase 6
0	2,72	2,58	160	2,72	2,58
10	2,72	2,58	170	2,72	2,58
20	2,72	2,58	180	2,72	2,58
30	2,72	2,58	190	2,41	2,58
40	2,72	2,58	200	2,41	2,58
50	2,72	2,58	210	2,41	2,58
60	2,72	2,58	220	2,41	2,58
70	2,72	2,58	230	2,41	2,58
80	2,72	2,58	240	0,72	2,58
90	2,72	2,58	250	0,72	0,6
100	2,72	2,58	260	0,72	0,6
110	2,72	2,58	270	0,72	0,6
120	2,72	2,58	280	0,72	0,6
130	2,72	2,58	290	0,72	0,6
140	2,72	2,58	300	0	0,6
150	2,72	2,58	310	0	0

A partir des résultats du tableau 3.4, on peut proposer une représentation graphique des fonctions de demande (figure 3.6).

On remarque que la mise en place de la restriction ne conduit pas nécessairement à une moindre consommation d'eau. Pour certaines gammes du prix d'accès à la ressource (c'est-à-dire le λ), la demande en quota peut-être supérieure à celle associée à la situation de référence non

30. Le principe de Le Chatelier peut être explicité de façon élémentaire : si l'on modifie les conditions d'un système en équilibre, celui-ci réagit de façon à s'opposer en partie aux changements qu'on lui impose, jusqu'à ce qu'il atteigne un autre état d'équilibre.

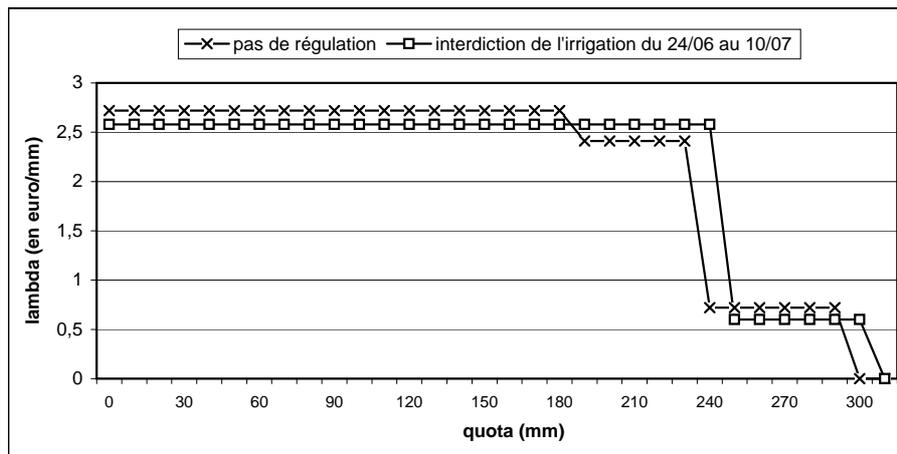


FIGURE 3.6 – Modification de la demande en quota induite par une interdiction de l’irrigation régulée. C’est le cas par exemple pour $0,72 < \lambda < 2,58$ ou $\lambda < 0,6$. L’ambiguïté des conséquences d’une interdiction d’arrosage sur le niveau des prélèvements réalisés s’explique par le fait que ceux-ci sont fonction simultanément des dates d’accès et du prix de la ressource : l’interdépendance de ces deux variables rend impraticable l’identification de la fonction de réaction de l’exploitant à l’arrêt préfectoral.

Remarque 3 Réguler la consommation d’eau par des restrictions d’usage revient à déterminer l’offre de ressource au cours du temps. En situation non contrainte par exemple, l’offre est décrite par la fonction de correspondance de chaque quota souscrit avec sa valeur marginale associée ; mais quand les arrosages sont interdits, elle est nulle. Or, si les demandes en quota pour différentes mesures d’interdiction peuvent être comparées, il n’en est pas de même pour les demandes en permissions d’irriguer (périodes où l’irrigation est autorisée) pour différents niveaux de quota. Dans ce dernier cas, la demande est conditionnelle à l’offre naturelle de ressource (la pluie) : les fonctions de demandes en jours ouvrables à l’irrigation et relatives à des offres en quota dissemblables ne peuvent donc pas être comparées. Dès lors, toute conclusion tirée d’une comparaison de demande “croisées” (superposition de fonctions de demande variables à la fois dans les quotas et les périodes d’accès à l’eau) serait incorrecte.

Le tableau E.7.5 présente les profits (Π) et les valeurs marginales du quota (λ) et du débit (ϖ) associés à différents quotas ($\bar{Q} = 100$, $\bar{Q} = 200$ et $\bar{Q} = 300$) et pour chacune des phases d’arrêt décrites dans le tableau 3.1. Les profits sont en €/ha et les valeurs marginales du quota et du débit en €/mm.

TABLE 3.5 – Valorisation du quota et de la disponibilité de la ressource dans le temps

Phase d'arrêt	$\bar{Q} = 100$			$\bar{Q} = 200$			$\bar{Q} = 300$		
	Π	λ	ϖ	Π	λ	ϖ	Π	λ	ϖ
Phase 1	-90,55 (=)*	2,72 (=)**	0	175,61 (=)*	2,41 (=)**	0	315,28 (=)*	0 (=)**	0
Phase 2	-90,55 (=)*	2,72 (=)**	0	175,61 (=)*	2,41 (=)**	0	315,28 (=)*	0 (=)**	0
Phase 3	-90,55 (=)*	2,72 (=)**	0	175,61 (=)*	2,41 (=)**	0	315,28 (=)*	0,72 (=)**	0
Phase 4	-98,32 (-8,58%)*	2,65 (-2,57%)**	0,16	159,19 (-9,35%)*	2,29 (-4,98%)**	0,18	299,52 (-5%)*	0 (=)**	0,13
Phase 5	-98,32 (-8,58%)*	2,65 (-2,57%)**	0,22	153,67 (-12,49%)*	2,01 (-16,60%)**	0,46	281,54 (-10,70%)*	0,79 (+∞)**	0,89
Phase 6	-104,70 (-15,63%)*	2,58 (-5,15%)**	0,63	153,6 (-12,53%)*	2,58 (7,05%)**	0,30	293,19 (-7,01%)*	0 (=)**	0,27
Phase 7	-98,81 (-9,12%)*	2,64 (-2,94%)**	0,13	152,71 (-13,04%)*	2,01 (-16,60%)**	0,49	288,20 (-8,59%)*	0,92 (+∞)**	0,65
Phase 8	-90,55 (=)*	2,72 (=)**	0	168,88 (-3,83%)*	2,07 (-14,11%)**	0,31	255,78 (-18,87%)*	0 (=)**	0,96
Phase 9	-90,55 (=)*	2,72 (=)**	0	171,65 (-2,25%)*	2,21 (-8,30%)**	0,10	277,65 (-11,94%)*	0 (=)**	0,61
Phase 10	-95,79 (-5,79%)*	2,67 (-1,84%)**	0,08	153,41 (-12,64%)*	1,77 (-26,56%)**	0,70	283,76 (-10,00%)*	0 (=)**	0,55
Phase 11	-95,79 (-5,79%)*	2,67 (-1,84%)**	0,08	169,32 (-3,58%)*	2,57 (6,64%)**	0,20	310,06 (-1,66%)*	0,63 (+∞)**	0,05
Phase 12	-90,55 (=)*	2,72 (=)**	0	175,61 (=)*	2,41 (=)**	0	315,28 (=)*	0 (=)**	0
Phase 13	-90,55 (=)*	2,72 (=)**	0	175,61 (=)*	2,41 (=)**	0	315,28 (=)*	0 (=)**	0
Phase 14	-90,55 (=)*	2,72 (=)**	0	175,61 (=)*	2,41 (=)**	0	315,28 (=)*	0 (=)**	0
Pas de restriction	-90,55 (=)*	2,72 (=)**	-	175,61 (=)*	2,41 (=)**	-	315,28 (=)*	0 (=)**	-

* Les chiffres entre parenthèses représentent les variations du profit par rapport à une situation où l'irrigation n'est pas limitée. Le signe "=" signifie que la mise en place de la restriction ne modifie pas le profit.

** Les chiffres entre parenthèses représentent les variations de la valeur du quota à la marge par rapport à une situation où l'irrigation n'est pas limitée. Le signe "=" signifie que la mise en place de la restriction ne modifie pas le λ . Ces variations sont égales à $+\infty$ lorsque $\lambda = 0$ dans le cas non contraint.

Dynamique des variables adjointes

[λ] C'est la valeur marginale du quota \bar{Q} . On constate qu'elle est corrélée avec le profit (plus le quota permet de procurer un profit élevé, plus l'irriguant est logiquement prêt à payer pour pouvoir en disposer) mais pas sa variation par rapport au cas non contraint : par exemple, pour $\bar{Q} = 200$, une interdiction de l'irrigation imposée à la phase 6 entraîne une diminution du profit de 12,53%, alors que le λ progresse dans le même temps de 7,05% ; le même phénomène pourrait être décrit pour la phase d'arrêt 11. Les résultats confirment en outre que les effets d'une indisponibilité de la ressource sont très variables selon les intervalles d'interdiction : les caractéristiques climatiques et le stade phénologique de la plante au moment de la restriction sont des facteurs déterminant de son impact sur le rendement de la culture (par exemple, alors qu'une prohibition de l'usage de l'irrigation aux phases 1, 2, 3, 12, 13 ou 14 n'a aucun impact sur le profit généré à la récolte, celui-ci est diminué de 26,56% si l'interdiction intervient à la phase 10).

[ϖ] C'est la valeur marginale du débit durant la phase d'arrêt. Elle peut s'interpréter comme la disposition à payer de l'agriculteur pour bénéficier d'une unité d'eau à ce moment-là. Ainsi, une série de ϖ pour un quota donné fournit une représentation de la valorisation de la ressource par l'exploitant, fluctuante au cours de la campagne. On peut noter que les résultats numériques révèlent une relation de corrélation positive entre ϖ et la baisse du profit causée par la restriction : plus la contrainte est "coûteuse" en terme de baisse de profit relative, plus la disposition à payer de l'irrigant pour relâcher cette contrainte est forte (par exemple, pour $\bar{Q}=200$, le profit est diminué de 9,35% et $\varpi=0,18$ quand l'interdiction est imposée à la phase 4 ; si la phase 5 est prohibée, le profit est diminué de 12,49% et $\varpi=0,46$).

Relation entre λ et ϖ L'existence d'une relation d'anticorrélation entre λ et ϖ a été envisagée. En effet, il aurait été possible de penser que la propension à payer pour une ressource librement disponible durant les phases d'arrêt (ie. ϖ) était croissante avec le niveau du quota : si \bar{Q} est élevé, alors toute mesure visant à réduire l'irrigation paraît d'autant plus coûteuse qu'elle est la contrainte limitant le plus le rendement à la récolte. Or, $\lambda(\bar{Q})$ est une fonction décroissante³¹. Toutefois, les deux variables semblent indépendantes : on remarque par exemple,

31. L'analyse des distributions optimales de stratégies dans un espace de distribution continu a révélé que la valorisation de la ressource par l'agriculteur est décroissante avec \bar{Q} (la productivité de l'eau appliquée est décroissante). Plus prosaïquement, λ mesure de coût d'opportunité de la ressource utilisable exclusivement sur la saison : cette valeur est donc fonction du montant total du quota.

pour $\bar{Q}=200$, $\lambda_6 > \lambda_4 > \lambda_5$ alors que $\varpi_5 > \varpi_6 > \varpi_4$ (le numéro en indice est celui de la phase d'arrêt).

Interprétation économique des résultats

On considère ici un agriculteur doté d'un quota épuisable et non reportable sur une saison d'irrigation ultérieure : l'eau est par conséquent assimilable à une ressource non renouvelable. En ce sens, consommer la ressource à une période donnée signifie ne plus en disposer plus tard, ce qui suppose des particularités dans son mode de gestion. On identifie deux phénomènes déterminant dans la valorisation et l'usage de l'eau par l'exploitant :

Effet de rationnement La rareté de la ressource peut entraîner une dépréciation de sa valeur. L'irréversibilité des stress hydriques sur le développement de la plante a pour conséquence qu'aucun apport complémentaire n'est en mesure d'atténuer les effets des stress antérieurs. Dans ce cas, les efforts d'irrigation postérieurs à une restriction, même amplifiés, ne permettent pas de générer une récolte importante. La "valeur d'espoir" de l'eau (ie. sa profitabilité) est ainsi réduite et λ **diminue**. Ce phénomène peut conduire l'irriguant à réduire, voire annuler sa demande en eau si la croissance du végétal a été définitivement stoppée. Notons que le raisonnement naïf qui consisterait à dire qu'une interdiction d'arrosage entraîne automatiquement une augmentation de la valeur de l'eau est incorrect.

Effet de gaspillage Une interdiction temporaire des arrosages peut amener l'exploitant à irriguer excessivement aux autres périodes. L'impossibilité d'utiliser la ressource lors de la restriction contraint l'agriculteur à avancer ou reporter -au moins partiellement- les apports : parce qu'il lui est défendu d'irriguer durant la phase d'arrêt, il effectue aux périodes non contraintes des apports supérieurs à ceux qu'il aurait réalisés s'il n'y avait pas eu de restriction. Un tel schéma constitue un gaspillage d'eau vis-à-vis de celui appliqué en situation non régulée puisque le quota n'est plus alloué aux moments les plus favorables. La perte de valeur d'opportunité de la ressource s'explique par l'apparition (ou l'accentuation) du phénomène de drainage : l'eau s'infiltre en partie dans le sol et n'est pas récupérée par la plante. Ainsi, le coût d'opportunité à utiliser la ressource à un moment donné est plus élevé et λ **augmente**. En effet, cette distribution inefficace du quota disponible sur la campagne ne peut être "sans regret" (l'irriguant est indifférent à en faire usage à un instant plutôt qu'à un autre) que s'il est devenu plus coûteux de renoncer à cette allocation pour une autre.

Ces deux effets opposés sont illustrés par les résultats présentés dans le tableau E.7.5. L'examen des λ révèle par exemple que pour $\bar{Q}=100$, l'effet de rationnement est toujours supérieur ou égal à l'effet de gaspillage : quelle que soit la phase d'arrêt considérée, la variation de la valeur du λ par rapport à la situation dans laquelle l'irrigation n'est pas limitée est toujours négative (le λ a diminué) ou nulle (le λ est resté constant). Pour $\bar{Q}=300$, on observe le phénomène contraire : vis-à-vis d'une situation non contrainte, la valeur du λ est plus élevée lorsqu'une interdiction a été imposée aux phases 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 ou 11, ce qui signifie que l'effet de gaspillage est supérieur à l'effet de rationnement ; dans ce cas, l'exploitant est prêt à payer pour avoir plus d'eau pour compenser un gaspillage de ressource à des moments où celle-ci n'atteignait pas sa productivité marginale maximale. Enfin, pour $\bar{Q}=200$, la prédominance d'un des deux effets est variable : pour les phases d'arrêt 4, 5, 6, 7, 8, 9 et 10, l'effet de rationnement est supérieur à l'effet de gaspillage (les λ ont diminué) ; pour la phase d'arrêt 11, l'effet de gaspillage est supérieur à celui de rationnement (le λ a augmenté de 6,64%). Notons que les deux effets se combinent parfois de façon très subtile : les pressions sur les reports ou avancements de doses eux-mêmes ne semblent pas avoir d'influence prédéterminée sur la valorisation du quota à la marge. Par exemple, on observe des sauts dans la valeur du ϖ , qui témoignent de la très forte disposition à payer de l'irriguant pour retarder ou avancer plus particulièrement certaines restrictions (pour $\bar{Q}=100$, $\varpi=0,63$ à la phase 6 ; pour $\bar{Q}=200$, $\varpi=0,70$ à la phase 10 ; pour $\bar{Q}=300$, $\varpi=0,96$ à la phase 8 et 0,89 à la phase 5) ; mais aucun effet clair sur le λ ne peut être identifié (dans les mêmes conditions et vis-à-vis du cas non contraint, celui-ci a diminué, est resté constant ou a augmenté).

Ces résultats attestent de la complexité des processus biophysiques et de la difficulté de les intégrer dans l'analyse économique. Or, une politique de gestion des usages agricoles de la ressource en eau doit les prendre en compte pour être efficace. L'approche qui consiste à coupler un programme économique avec un simulateur agronomique comme Stics est alors justifiée : le processus d'optimisation de l'irrigant s'effectue de cette façon sur la fonction de réaction de la culture aux paramètres à la fois institutionnels (quota, débit, dates de rationnement) et naturels (climat, sol, propriétés de la plante).

3.6 Conclusion

En situation de pénurie, les pouvoirs publics mettent en place des mesures d'urgence qui peuvent prendre la forme de restriction d'usage de l'eau aux fins agricoles. Ce chapitre a présenté une approche bioéconomique pour évaluer l'impact d'une interdiction de l'irrigation sur la valeur

de la ressource et la fonction de demande en eau de l'irrigant. Un modèle de simulation de croissance de culture a été couplé avec un modèle de programmation non linéaire de façon à ce que le processus d'optimisation soit paramétré simultanément par les données agronomiques et économiques. L'application empirique a été réalisée pour le cas d'un agriculteur représentatif cultivant du maïs dans le Gers. Les résultats montrent que l'impact d'une restriction sur la disposition à payer de l'exploitant pour l'eau dépend de l'amplitude et de la date à laquelle la mesure est mise en œuvre. Deux effets s'opposent. D'un côté, un *effet de rationnement* entraîne une baisse de l'espérance de la valeur de la ressource parce que l'irréversibilité des stress hydriques causés par l'interdiction implique un rendement réalisable plus faible. D'un autre côté, un *effet de gaspillage* accroît le coût d'opportunité d'usage de la ressource parce que prohiber l'irrigation à un moment donné rend plus coûteux d'implémenter une allocation intra-annuelle de l'eau qui soit "sans regret". Le résultat de la mise en place d'un tel dispositif est par conséquent ambiguë. Il peut provoquer une augmentation ou une diminution de la valeur de l'eau et induire selon les circonstances une consommation annuelle de ressource en eau plus importante qu'en situation non régulée.

Chapitre 4

Sharing water across heterogenous farmers under climate uncertainty

4.1 Introduction

Climate change and growing water needs have resulted in many parts of the world in water scarcity problems that must be managed by public authorities. Hence, policy-makers are more and more often asked to define and to implement water allocation rules between competitive users. This requires to develop new tools aiming at designing those rules for various scenarios of context (climatic, agronomic, economic). In this chapter, we consider the problem of sharing water across heterogenous farmers at a regional level and we build a model allowing to optimally allocate a scarce water resource in a climate risky environment. There already exist a number of articles having addressed similar issues. Compared to this existing literature, first we explicitly introduce intra-annual water use by farmers, second we consider endogenous crop choices and third we introduce climate risk.

Focusing on intra-annual agricultural water consumption is relevant from a policy point of view since the social value of water may vary according the period of the year. It is likely that the social value is higher in summer when high competition across water users results in scarcity rents. As a result, it makes economic sense to charge more at these times since the opportunity cost of water consumption is higher. If the agronomic literature on intra-annual water use is abundant, the economic literature is more limited.

McGuckin et al. have developed a dynamic programming model of irrigation scheduling which account for stochastic weather conditions [McGuckin et al., 1987]. The decision to irrigate or not

to irrigate is based on two state variables, namely soil moisture and potential evapotranspiration. The general recursive equation is solved numerically. The dynamic programming decision rules significantly outperform nonstress irrigation strategies. Bontemps and Couture have developed an optimal control approach in order to explain the optimal irrigation management plan of a risk neutral farmer [Bontemps and Couture, 2002]. The discrete irrigation decision is based on three state variables : the water soil content, the crop biomass and the remaining water quota. Shani et al. have used an analytical optimal control approach to derive the optimal irrigation scheme based on the dynamic response of the biomass yield to soil moisture [Shani et al., 2004]. The optimal policy consists in driving the water content towards the turnpike as quickly as possible, and then to irrigate at the rate required to maintain the soil water content at that level. Shani et al. demonstrate that this type of policy is robust to various situations [Shani et al., 2004]. Peterson and Ding have specified an irrigated corn production function in western Kansas by including four water inputs corresponding to water applied at different stages of growth (preplant, vegetative, flowering, ripening) [Peterson and Ding, 2005]. They estimate a Just-Pope production function using data generated from a daily-loop plant growth simulator designed for western Kansas conditions. Interestingly, they show that water is a risk decreasing input in some growth stages (flowering, ripening) and a risk increasing input in others (preplant, vegetative). Considering different water inputs is then relevant from an economic point of view. Although this framework constitutes a step towards a more realistic representation of crop yield function, it does not take explicitly into account the sequentiality of the irrigation scheduling problem. It neither integrates the timing of climate uncertainty resolution.

Considering farmer's intra-annual decision is relevant for managing agricultural water use for two main reasons. First, the timing of the cropping calendar can also be used as a technique to reduce irrigated water use, [Collins et al., 2009]. Early sowing, for example, can help capture winter rains so that the need for supplementary irrigation is reduced. Early sowing also helps avoid the extreme evapotranspiration rates typical of Mediterranean summers. Second, typically the crop growth process is time dependant. This is particular true concerning the impact of water. For example, regarding maize irrigation, experiments show that a single irrigation at tasselling can increase yield by 29%. Additional irrigations during the vegetative and grain filling stages increased yield an additional 11% and 13% [Norwood and Dumier, 2002].

Optimal allocation of agricultural water across the irrigation season and among crops is an important challenge nowadays since water is increasingly a limiting production factor. This is

especially true during peak periods of demand when farmers compete hardily for the resource. Plant growth is governed by complex physical and biological processes and irrigation problems are typically dynamic. The existing literature includes some famous dynamic programming models allowing to optimize irrigation scheduling or acreage choice [Dudley et al., 1971] and sometimes with stochastic weather patterns [Bryant et al., 1993]. However, another major difficulty is that irrigation decisions are related to cropping system choices that can not be adjusted in the short run. As a result, farmer risk preferences impact on optimal decisions. Acreage supply response function models under expected utility maximization have been developed for a representative farmer who is not subject to land constraint [Chavas and Holt, 1990] or facing random yields without taking into account climate uncertainty [Polomé et al., 2006]. This problem has been theoretically conveniently stated in term of sequential decision theory involving specification of possible actions, states of nature, probabilities of the states of nature, consequences of the actions given the various states of nature, and a utility function to be maximized [Rae, 1971]. But empirical applications failed to explicitly introduce uncertainty of climate in an acreage and intraseasonal water allocation objective.

We consider the problem of sharing water across heterogenous farmers located in a small agricultural region. To answer this problem, we build a model allowing to optimally allocate a scare water resource in a climate risky environment. An individual optimization model representing how farmers determine their land use and irrigation choices under climate uncertainty has been integrated in a regional water allocation model. The problem of the regional water manager is then to maximize the expected utility of agricultural profits generated by water use in each possible state of the nature under a water availability constraint. We propose an original approach for the empirical application which consists in applying an optimization process on climatic-contingent agricultural production functions econometrically estimated from datasets generated by a biophysical model. We use this methodology to evaluate economic scenarios as new water allocation rules.

The chapter is organized as follows. Section 4.2 presents the theoretical model of land and water use under climate uncertainty at the regional level. Section 4.3 is devoted to an empirical application on an agricultural region located in Southwest of France. Results are presented in section 4.4.

4.2 The regional model of land and water use under climate uncertainty

4.2.1 Representation of the climatic risk

4.2.1.1 Climate as a stochastic event

We model the climate risk as a stochastic event characterized by a discrete probability distribution known by farmers. The possible climate realizations $\{\tilde{\varepsilon}_1, \dots, \tilde{\varepsilon}_c, \dots, \tilde{\varepsilon}_C\}$ are indexed by $c = 1, \dots, C$. We denote by $\lambda_c \in [0, 1]$ with $\sum_c \lambda_c = 1$ the probability associated to the realization of climate state of the nature c . Climate realization impacts both on regional water availability and crop growth processes.

4.2.1.2 Impact of climate on regional water availability

Water availability for the whole region depends upon the climatic risk. We denote by $\bar{W}(\tilde{\varepsilon}_c)$ the water available at the regional level that must be allocated across farmers. A “good” state of the nature will result in a high quantity of water available. A “bad” state of the nature corresponds to a dry year where the quantity of water is limited.

4.2.1.3 Modeling the impact of climate on crop yields

We consider a region where K different crops can be produced by farmers. Those crops are indexed by $k = \{1, \dots, K\}$. As mentioned previously, the climate realization has an impact on crop yield. This impact is modeled in the following way. First, we discretize the irrigation campaign into T slots indexed by $s = 1, \dots, T$. One slot corresponds to a fixed period of time (measured in days) at which irrigation may or may not occurs and we denote by ω_{kt} the quantity of irrigation at time t used for crop k . Second, the relationship between irrigation and yield is modeled through a climatic-contingent agricultural production technology. The climatic-contingent yield function for crop k writes :

$$Y_k^{\tilde{\varepsilon}} = f_k^{\tilde{\varepsilon}}(\omega_1, \dots, \omega_t, \dots, \omega_T) \quad (4.1)$$

This function is contingent to the realization of the climatic risk $\tilde{\varepsilon}$. It gives for any crop, given a climate realization, the agricultural product that may be obtained from this crop by unit of area if the vector of irrigation $\omega = \{\omega_1, \dots, \omega_t, \dots, \omega_T\}$ is implemented. Notice that this yield

function requires a precise representation of the relationship between water and yield, which is usually not available from national agricultural databases. As we will discuss in the next section, we estimate this relationship using biophysical crop growth model simulations.

4.2.2 Regional agricultural model under climatic risk

4.2.2.1 A bottom-up approach

We build an agricultural production model allowing to derive the regional agricultural surplus generated by water use. The agricultural region is made of N farmers categorized into J types indexed by $j \in \{1, \dots, J\}$.³² We denote by n_j the number of farmers represented by type j . By definition, we have $\sum_j n_j = N$.

We first develop a micro optimization model in order to represent the behavior of a farmer of type j . The farmer maximizes its expected utility of profit under climate uncertainty and under land and water resources constraints. He allocates the available land across all possible crops and defines irrigation for each crop at each date of the growing season (section 4.2.2.2). Then, micro production outcomes for all types of farmers are aggregated at the regional level. We then obtain land use and agricultural surplus from water use for the whole region (section 4.2.2.3).

4.2.2.2 Farmer's individual problem

Timing of the farmer's decisions The farmer chooses first the land to be allocated to each crop (*land use choice*), irrigated or not irrigated. This choice is taken ex-ante, that is before observing the realization of climate risk, see figure 4.1. The farmer knows however the probability associated to each possible climate. Then the farmer learns the climate risk realization and chooses the quantity of water applied at each date of the cropping season to each irrigated crop (*water use choice*). Irrigation decisions are taken ex-post, that is conditionally to the climate realization. The realization of the climate risk and the irrigation decisions result in a given yield for each crop.

Farmer's decision variables

Land use choice Ex-ante that is given the probability distribution associated to the climate risk, farmer j allocates his agricultural land among the K possible crops. We denote by l_{jk} and

32. The typology of farmers is based on selected characteristics that will be described in the empirical application.

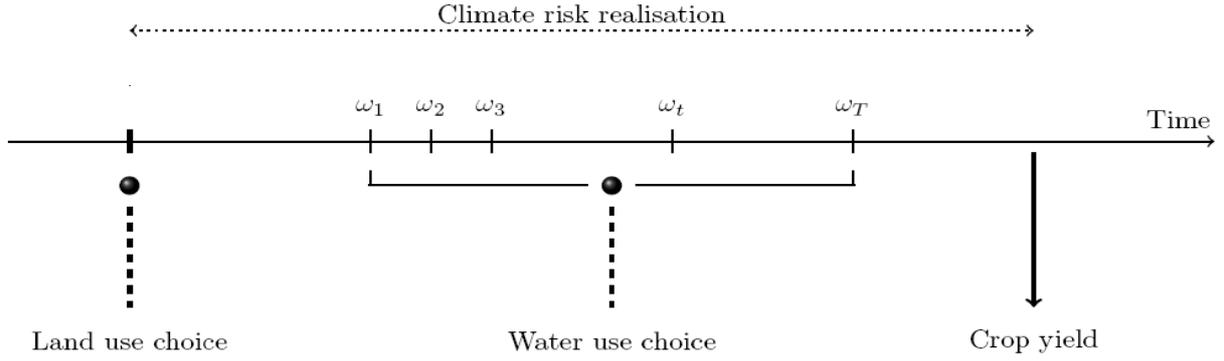


FIGURE 4.1 – Timing of the farmer's decisions

l'_{jk} the land allocated by farmer j to crop k respectively with and without irrigation. The two following constraints must hold :

$$\sum_k (l_{jk} + l'_{jk}) \leq \overline{l_{totj}} \quad (4.2)$$

$$\sum_k l_{jk} \leq \overline{l_j} \quad (4.3)$$

where $\overline{l_{totj}}$ and $\overline{l_j}$ are respectively the total agricultural land and the total irrigated land available for farmer j . Since the first constraint may not be binding, we allow the farmer not to use all the agricultural land available. Hence, we implicitly introduce the possibility of fallow.

Water use choice Ex-post that is conditionally to the climatic state of the nature, farmer j take his irrigation decisions. We denote by $\omega_{jkt}(\tilde{\varepsilon}_c)$ the quantity of water applied by the farmer j at the date t to an irrigated crop k if climate risk $\tilde{\varepsilon}_c$ is realized. The total water consumption of farmer j is denoted by $\omega_j(\tilde{\varepsilon}_c)$. By definition we have :

$$\omega_j(\tilde{\varepsilon}_c) = \sum_{t,k} \omega_{jkt}(\tilde{\varepsilon}_c) \quad (4.4)$$

Farmer's optimization program under climate uncertainty

Farmer's profit For a given crop k , we denote by c_k and c'_k the unit cost of production per unit of area³³ respectively with and without irrigation. We denote by c_w the unit water

33. Unit cost of production excluding water expenses.

price paid by the farmer. The total agricultural production cost for farmer j conditionally to the realization of $\tilde{\varepsilon}_c$ writes :

$$cost_j(\tilde{\varepsilon}_c) = \sum_k (l_{jk} \cdot c_k + l'_{jk} \cdot c'_k) + [c_w \cdot \omega_j(\tilde{\varepsilon}_c)] \quad (4.5)$$

We denote by p_k the unit price of the crop. The agricultural gross income conditionally to the realization of $\tilde{\varepsilon}_c$, denoted by $income_j(\tilde{\varepsilon}_c)$, is :

$$income_j(\tilde{\varepsilon}_c) = \sum_k p_k \cdot \left[l_{jk} \cdot f_k^{\tilde{\varepsilon}}(\omega_{jk1}(\tilde{\varepsilon}_c), \dots, \omega_{jkt}(\tilde{\varepsilon}_c), \dots, \omega_{jkT}(\tilde{\varepsilon}_c)) + l'_{jk} \cdot f_k^{\tilde{\varepsilon}}(0, \dots, 0, \dots, 0) \right] \quad (4.6)$$

The total income is simply the sum of the gross income that the farmer get both from the irrigated and the non irrigated crops. Notice that since the crop price is the same in both cases, we implicitly assume that there is no difference in quality between a crop that has been irrigated and a crop that has not. The only difference will be related to the higher yield that can usually be obtained using irrigation.

Finally, we denote by $\Pi_j(\tilde{\varepsilon}_c)$ the agricultural net profit of farmer j if $\tilde{\varepsilon}_c$ is realized. By definition :

$$\Pi_j(\tilde{\varepsilon}_c) = income_j(\tilde{\varepsilon}_c) - cost_j(\tilde{\varepsilon}_c) \quad (4.7)$$

Farmer's optimization program The utility function of farmer j is denoted by $U_j(\cdot)$ with $U' > 0$ and $U'' < 0$. Assuming he is allocated by the regional water manager a vector of climate-contingent water quotas $\bar{w}_j = [\bar{w}_j(\tilde{\varepsilon}_1), \dots, \bar{w}_j(\tilde{\varepsilon}_c), \dots, \bar{w}_j(\tilde{\varepsilon}_C)]$,³⁴ the optimization problem of farmer j under climate uncertainty \mathcal{P}_j writes :

$$\max_{\{l_{jk}, l'_{jk}, \omega_{jkt}(\tilde{\varepsilon}_c)\}_{\forall k,t,c}} EU_j = \sum_c \lambda_c \cdot U_j[\Pi_j(\tilde{\varepsilon}_c)] \quad (4.8)$$

34. Regulating water use through a climate-contingent water quota is a relevant situation, especially in South-west of France. For instance, in the Neste system farmers subscribe water quotas that can be revised by the water manager if water stocks at the beginning of the irrigation campaign are too low.

$$\begin{array}{l}
\left. \begin{array}{l}
l_{jk} \geq 0 \quad \forall k \quad (8.a) \\
l'_{jk} \geq 0 \quad \forall k \quad (8.b) \\
\sum_k (l_{jk} + l'_{jk}) \leq \overline{l_{tot,j}} \quad (8.c) \\
\sum_k l_{jk} \leq \overline{l_j} \quad (8.d) \\
\omega_{jkt}(\tilde{\varepsilon}_c) \geq 0 \quad \forall k, t, c \quad (8.e) \\
\sum_{kt} \omega_{jkt}(\tilde{\varepsilon}_c) \leq \overline{w_j}(\tilde{\varepsilon}_c) \quad \forall k, t, c \quad (8.f)
\end{array} \right\} \text{s. to}
\end{array}$$

where the agricultural net profit is defined by equation (4.7). The farmer maximizes the expected utility of its profit. Control variables have been defined above. Constraints (8.a) and (8.b) guaranty that irrigated and non irrigated land allocations are non negative. (8.c) and (8.d) correspond to land availability constraints. For irrigated crops, the water applied at each date must be non negative (8.e) and the total water consumption of the farmer must be lower than a farmer type-specific and climatic-depend quota $\overline{w_j}(\tilde{\varepsilon}_c)$ (8.f).

Solving the optimization problem P_j gives the optimal farmer's decisions conditionally to the vector of climate-dependent quota $\overline{w_j}$, namely the quantity of water applied at each date to each irrigated crop $\hat{\omega}_{jkt}(\overline{w_j}, \tilde{\varepsilon}_c) \forall k, t$, the land allocated to each irrigated crop $\hat{l}_{jk}(\overline{w_j}) \forall k$ and to each non irrigated crop $\hat{l}'_{jk}(\overline{w_j}) \forall k$. Then, we can derive the corresponding profit $\hat{\Pi}_j(\overline{w_j}, \tilde{\varepsilon}_c)$ and the associated expected utility $\widehat{EU}_j(\overline{w_j})$.

4.2.2.3 Regional objective function

The regional objective function is then the sum of expected utilities of profits for all farmers. It writes :

$$Obj = \sum_j n_j \cdot \widehat{EU}_j(\overline{w_j})$$

where n_j is the number of j -type farmers and $\overline{w_j} = [\overline{w_j}(\tilde{\varepsilon}_1), \dots, \overline{w_j}(\tilde{\varepsilon}_c), \dots, \overline{w_j}(\tilde{\varepsilon}_C)]$ the vector of quota for each climate realization. Obj is the regional expected utility that can be obtained from a vector $\overline{W} = (\overline{W}(\tilde{\varepsilon}_1), \dots, \overline{W}(\tilde{\varepsilon}_c), \dots, \overline{W}(\tilde{\varepsilon}_C)) = \sum_j n_j \cdot \overline{w_j}$ that describes the regional

water availability in all possible states of the nature.

4.2.3 The regional water allocation problem

The problem of the water manager is then to allocate the water quotas across farmers, in each possible state of the nature, in order to maximize the regional expected utility generated by water use. \mathcal{P}^{WM} writes :

$$\max_{\{\bar{w}_j\}_{\forall j}} \text{Obj} = \sum_j n_j \cdot \widehat{EU}_j(\bar{w}_j) \quad (4.9)$$

$$\text{s. to} \quad \sum_j n_j \cdot \hat{\omega}_j(\bar{w}_j, \tilde{\varepsilon}_c) \leq \bar{W}(\tilde{\varepsilon}_c) \quad \forall c$$

where $\hat{\omega}_j(\bar{w}_j, \tilde{\varepsilon}_c) = \sum_{kt} \hat{\omega}_{jkt}(\bar{w}_j, \tilde{\varepsilon}_c)$ is the total water consumption of the farmer j . The constraint states that, for each possible state of the nature, the amount of water applied for irrigation purposes by all type of farmers should be lower than the amount of water available at the regional level $\bar{W}(\tilde{\varepsilon}_c)$.

The solution of the water manager optimization problem \mathcal{P}^{WM} gives for each type of farmer the collection of climate-dependent quotas, $\bar{w}_j^* = [\bar{w}_j^*(\tilde{\varepsilon}_1), \dots, \bar{w}_j^*(\tilde{\varepsilon}_c), \dots, \bar{w}_j^*(\tilde{\varepsilon}_C)]$, that maximizes the regional agricultural surplus.

Plugging these optimal quotas into farmer's optimization program (equation 4.8 and following), we can derive the optimal farmer decisions, such as the quantity of water applied at each date to each irrigated crop $\hat{\omega}_{jkt}^* = \hat{\omega}_{jkt}(\bar{w}_j^*, \tilde{\varepsilon}_c) \forall k, t$, the land allocated to each irrigated crop $\hat{l}_{jk}^*(\bar{w}_j^*) \forall k$ and to each non irrigated crop $\hat{l}'_{jk}(\bar{w}_j^*) \forall k$. These land and water use choices maximize the regional expected utility of profit.

4.3 An Empirical Application to Southwest of France

In this section, we apply the regional water allocation model to a region located in Southwest of France. First, we present the economic and agronomic data (4.3.1) and then, the methodology followed to take into account the impact of climate (4.3.2).

4.3.1 Economic and agronomic context

4.3.1.1 The agricultural region

The model has been used for modeling water and land use for an agricultural region located in the Neste system, Southwest of France, see figure D.1 in appendix D.1. The Neste system is a system of rivers artificially recharged by upstream reservoirs located in the Pyrenees mountain through a single canal. It covers 800,000 ha area and gathers the catchment areas of 14 main rivers. The land is mainly dedicated to agriculture (500,000 ha are cultivated from which 50,000 ha are irrigated). Within the APPEAU project, 66 agricultural regions have been identified in the Neste system, based on an agronomic homogeneity criterion [Clavel and Leenhardt, 2008]. Those agricultural regions are characterized by specific cropping systems, climate conditions, soil characteristics and connections to the water network.

The empirical application presented in this section has been conducted for the region 18, one of the 66 regions identified in the Appeau project. This region is located near Auch (see figure D.1). More than 500 farmers cultivate 30,000 ha in the region 18, from which 4,000 are irrigated. Farmers mainly cultivate corn, bread and hard wheat but also soybean, rape and sunflower³⁵, see table 4.1. This area is characterized by an oceanic climate with a strong Mediterranean influence during the summer. Droughts were exceptional events until the 1990's but are nowadays recurrent in the area and occur increasingly since the beginning of the 2000's. Local streams were those which most suffered in France from the 2003 summer heat wave [Bertin et al., 2005].

4.3.1.2 The typology of farmers

Regional agricultural water demand depends on the farmers' irrigation practices which themselves depend on the farmers' characteristics. Easily accessible farm characteristics could be good indicators of farmers' practices [Maton et al., 2005]. We build a typology of farmers based on the economic farm size, the cropping system and the irrigation intensity [Clavel and Leenhardt, 2008]. We considered 4 classes of farm size³⁶ (very small [ESU < 8], small [$8 \leq$ ESU < 40], average [$40 \leq$ ESU < 100] and large [ESU \geq 100]), 3 cropping systems (cash crops farming, mixed/livestock farming, 'other farming') and two levels of irrigation intensity (depending on whether less or more than 20% of the agricultural land is irrigated). By crossing these 3 criteria,

35. We only considered field crops representing more than 2% of the total agricultural land.

36. Farm size is stated in ESU (European Size Unit) which is a measure of the economic size of a farm business based on the gross margin imputed from standard coefficients (for instance, 1 ESU roughly corresponds to 1.3 hectares of cereals).

TABLE 4.1 – Region 18 acreage allocation in 2000 (from agricultural census data)

	Agricultural land	
	in ha	share in percent
Bread wheat	6590.98	21.10
Hard wheat	912.63	2.92
Corn	3716.77	11.90
Sorghum	303.77	0.97
Other cereals	1378.21	4.41
Sunflower	3073.55	9.84
Soybean	1055.86	3.38
Rape	1009.31	3.23
Pea	52.95	0.17
Forage	4792.82	15.34
Vine	1485.85	4.76
Fallow	3308.26	10.59
Grassland	1856.87	5.94
Other	1696.88	5.43
Total	31234.71	100.00

we get 11 farmer types, detailed in table 4.2. We note that small and average farms are the more represented and that cash crop farming is the dominant activity. Crops cultivated by each type of farmers have been identified thanks to agricultural census data (year 2000) and are summarized in table 4.3. Note that a typology of soils has been define based on agronomical studies and observed cropping systems : a specific soil is associated to each type of farmer/cultivated crop combination.

4.3.1.3 Specification of economic data

We calibrated the economic optimization model, with data of year 2003 on crop prices, taxes, water prices, crop-specific unit production costs and decoupled payments [Cemagref and Cacg, 2005]. Those parameters are presented in tables 4.4, 4.5 and 4.6 :

The preferences of farmers are represented by a constant relative risk aversion utility function (CRRA) :

$$U_j(\Pi_j) = \frac{\Pi_j^{1-\beta}}{1-\beta}$$

4.3.2 Impact of climate

Data on past climate realizations have been provided by the Inra Department of Agronomy. We regarded the 4 climatic years 2000-2003 as possible weather scenarios. Note that these four

TABLE 4.2 – Typology of farmers in the region considered

Type of farm j^\dagger	Size (ESU)	Irrigation intensity	n_j	l_{tot_j} (ha)
Very small farms (all farming activities)				
type vsf	[0,8]	[0%]	115	7.32
Cash crops farming				
type $C_{i^-}^s$	[8,40]	[0%,20%]	86	40.08
type $C_{i^+}^s$	[8,40]	[20%,100%]	20	46.36
type $C_{i^-}^a$	[40,100]	[0%,20%]	53	106.33
type $C_{i^+}^a$	[40,100]	[20%,100%]	44	92.13
type $C_{i^-}^l$	>100	[0%,20%]	9	214.20
type $C_{i^+}^l$	>100	[20%,100%]	9	196.87
Mixed/livestock farming				
type M^s	[8,40]	[0%,100%]	75	39.07
type M^a	[40,100]	[0%,100%]	65	80.33
type M^l	>100	[0%,100%]	6	176.02
Other farming activities				
type ofm	≥ 0	[0%,100%]	97	35.28

† We note by C the cash crops farms and by M the mixed/livestock farms. i^- indicates a low irrigation intensity and i^+ a high irrigation intensity. s means “small”, a “average” and l “large”. We write ofm for the other farming activities and vsf for the very small farms.

TABLE 4.3 – Corresponding soil^a to each crop/type of farmer combination

	Type of farmer										
	vsf	$C_{i^-}^s$	$C_{i^+}^s$	$C_{i^-}^a$	$C_{i^+}^a$	$C_{i^-}^l$	$C_{i^+}^l$	M^s	M^a	M^l	ofm
wheat	A	A	A	A	D	A	D	A	A	A	B
hard wheat	.	.	C	A	A	A	A	.	.	C	.
corn	A	A	C	A	D	A	D	C	C	C	B
sorghum	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
rape	.	A	.	A	D	A	D	.	.	C	.
sunflower	C	C	C	C	D	C	.	C	C	C	B
soybean	.	.	A	D	D	D	D	.	.	A	.
pea	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.

^a The soils of the region are *hilly soils on smooth slopes* (A), *hilly soils on steep slopes* (B), *recent alluvium* (C) and *Old alluvium terraces* (D).

TABLE 4.4 – Prices and taxes

Crops	Prices €/ton	Drying charges €/ton	Taxes €/ton
Wheat	95 ^a	-	1.37 ^a
Hard wheat	120 ^a	-	1.37 ^a
Grain corn	98 ^a	12.8 ^a	0.90 ^a
Sunflower	200 ^a	6.4 ^a	3.02 ^a
Soybean	184 ^a	-	3.02 ^a
Rape	200 ^a	-	3.02 ^a

^a [Cemagref and Cacg, 2005]

TABLE 4.5 – Operational charges and agricultural policy

Crops	Variable charges (€/ha)		CAP subsidy (€/ha)	
	Non irrigated	Irrigated	Non irrigated	Irrigated
Wheat	357 ^a	357 ^a	312 ^a	312 ^a
Hard wheat	460 ^a	460 ^a	529 ^{a,b}	529 ^a
Grain corn	457 ^a	510 ^a	312 ^a	473 ^a
Sunflower	321 ^a	321 ^a	312 ^a	312 ^a
Soybean	349 ^a	349 ^a	312 ^a	473 ^a
Rape	442 ^a	442 ^a	312 ^a	312 ^a
Fallow	-	-	312 ^a	-

^a [Cemagref and Cacg, 2005] - subsidies effective in 2003.

^b Hard wheat cultivated in a dry way is “oversubsidised” compared with the others cereals.

TABLE 4.6 – Irrigation costs

Water costs (in €/m ³)	
Water price [†]	0.028
Water agency fee [‡]	0.00429

[†] [Cetiom, 2006]. Energy costs are included.

[‡] [Teyssier, 2006].

years allow to take fairly climate heterogeneity into account. 2000 and 2001 were ordinary years, 2002 was comparatively wet and summer 2003 is remembered as a major drought. For instance, average simulated corn yield are 8359 kg in 2000, 9047 kg in 2001, 11144 kg in 2002 and 4495 kg in 2003, see appendix D.5.1 for more details. Farmers face uncertainty with respect to the type of climatic scenario that could be realized. We consider the case of equal probabilities across years, that is $\lambda_c = \frac{1}{4}$.

4.3.2.1 Climate and water availability

Regional water availability is then defined as a function of the realized climatic year : $\bar{W} = (\bar{W}(\tilde{\varepsilon}_{2000}), \dots, \bar{W}(\tilde{\varepsilon}_{2003}))$. These hydrological data have been provided by the Adour-Garonne water agency, aggregating individual consumptions observed at the district level.

4.3.2.2 Climate and yield

For a given climate realization, for a given crop, for a given soil, we wish to estimate a crop yield function. This climatic-contingent function describes the relationship between any irrigation vector (quantity of water applied by the farmer at various dates of the growing season) and the final crop yield. Following notations in Equation 4.1, the climatic yield function writes :

$$Y_k^{\tilde{\varepsilon}} = f_k^{\tilde{\varepsilon}}(\omega_1, \dots, \omega_t, \dots, \omega_T).$$

To establish this relationship, we have first used a crop growth model to generate a set of data (irrigation vector / final crop yield). We have used the crop growth model STICS. This agronomic model is a generic soil-crop model simulating the crop growth from sowing to harvest at a daily time scale. STICS simulates on a daily basis the crop growth process as a function of the climate and the farmer's technical decision (irrigation, fertilization, etc.), see appendix D.2. STICS has been validated in various conditions (<http://www.avignon.inra.fr/stics>). We have used STICS first, because the C-version³⁷ allows to realize efficiently a large number of simulations [Poupa, 2006] and second, because it has been used in a large number of situations in France and in other countries. Then for a given crop, a given irrigation vector and a given climate realization, STICS gives the resulting yield to be expected by the farmer. STICS has then be simulated for all the possible vectors of irrigation. For instance, for corn, simulating STICS for a given climatic year gives 19,683 corn yields associated to each possible irrigation vector. STICS allows to build

37. We thank Jean-Claude Poupa for having developed and provided this version of STICS.

a dataset where each vector of irrigation is allocated the corresponding yield.

The next step consists in estimating the crop yield function based on this dataset. We first need to specify a functional form. We may use a flexible form such as a translog approximation. However, since irrigation vectors contain a lot of zeros, it appears not appropriated. As a starting point we have decided to approximate the unknown yield functions by simple quadratic forms. The yield functions have been reparameterized using the Cholesky decomposition and estimated using SAS, see Appendix A for selected examples of yield functions. We get a very good fit of the quadratic approximations with adjusted R² greater than 0.9 for all climatic years and all crops. This means that the quadratic form offers enough flexibility for approximating the unknown yield functions. Most of the estimated parameters are significant at 1%.

4.3.3 Writing the agro-climatic-economical problem as an integrated model

The farmers' behavior has been coded using the algebraic modeling language Gams [Rosenthal, 2008]. Gams is a comprehensive computer algorithm for solving large and complex mathematical programming models. We used non linear programming. The optimization process consists in computing the crop land sharing and irrigation strategies choices that maximizes the agricultural surplus. The program identifies the allocation of the land between the crops and the distribution of strategies on the fields which are technologically efficient and economically optimal. The model integrates both estimated crop-functions (for each climatic scenario and each soil) and economical data such as prices, costs or institutional constraints (quota for example). Therefore, farmer's decisions are parameterized by climate, soil, price of the crops, costs of production, cost of water and quota levels. We determinate the opportunity cost of the quota for each type of farmer, which is the marginal shadow price of the resource. Then, simulating for diverse quota constraints, we can generate the implicit water demand function.

4.4 Results of the empirical application

4.4.1 The baseline case

We have observed the total annual water consumption for all farmers located in UDS 18. This consumption varies from 4.22 million cubic meters in 2000 to 5.75 in 2003. Based on agricultural census data, the water consumption represents on average 1410 cubic meters per irrigated ha. As a starting point, we have constrained the total water consumption for the whole region to be inferior or equal to the observed one. The model then identifies the intra-regional allocation of the available water quotas across farmers.

4.4.1.1 The implicit regional value of water

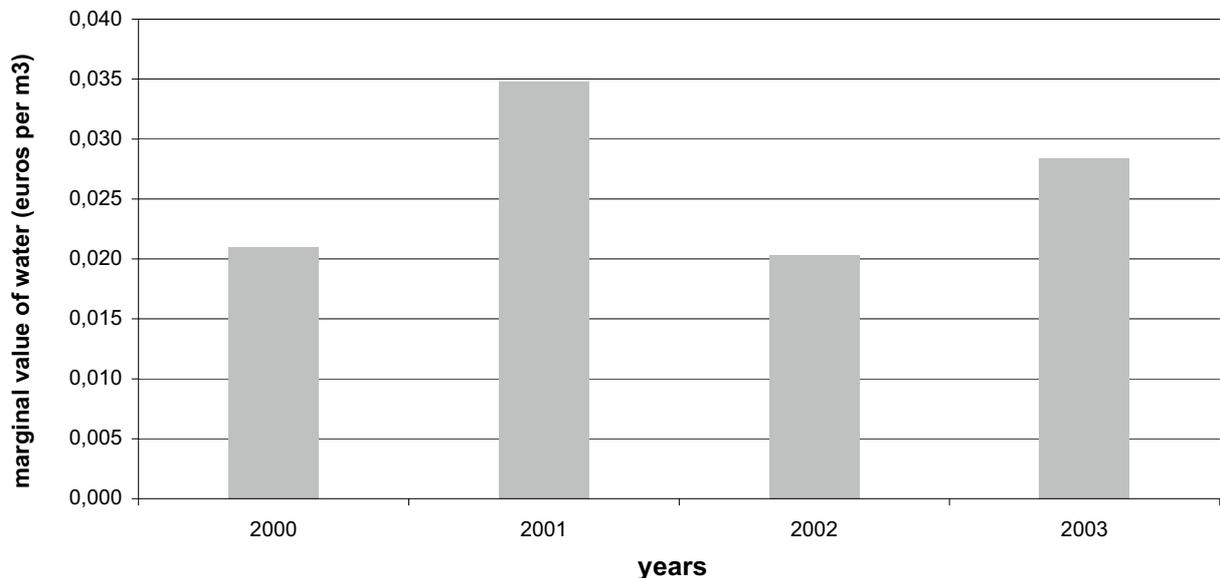


FIGURE 4.2 – Implicit marginal value of water

Since the regional water consumption is constrained each year to be equal to the observed one, we can estimate the implicit regional value of water which is directly given each year by the Lagrange multiplier associated to this regional water constraint. The Lagrange multiplier gives the regional shadow price of the water resource or the implicit value of water for farmers. In the Figure 4.2 , we report the Lagrange multiplier associated to this constraint. The marginal value of water varies from 2 cents per cubic meter in 2002 to a little bit less than 3.5 cents in 2001. These values may be viewed as relatively low however they must not be interpreted as measures of the average productivity of water but as measures of the marginal productivity of water. This regional implicit value of water is an important indicator for public authorities since it can be

viewed as the price uds_{18} is ready to pay to get one additional cubic meter of water. This implicit value of water will then drive the reallocation of water from one region to another.

4.4.1.2 Optimal intra-annual water use

Next, we analyze how the available water is allocated across slots. As it will be discussed later, farmers located in uds_{18} produce two types of irrigated crops, namely corn and soybean. For these two crops, there are 9 slots for which irrigation is possible from June 15th to August 26th. In Figure 4.3, we report the intra-annual repartition of water for years 2000 and 2002.

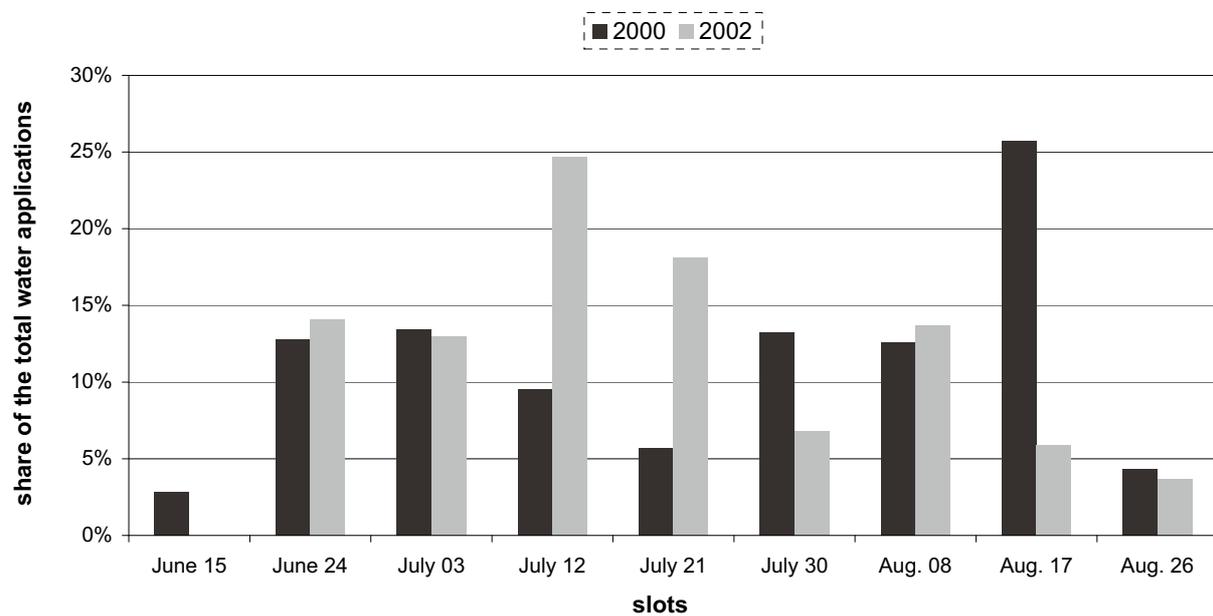


FIGURE 4.3 – Intra-annual repartition of available irrigation water (years 2000 and 2002)

For year 2002, the peak water consumption corresponds to the fourth slot (from July 12 to July 20) compared to the eighth slot (from August 17 to August 25) for year 2000. The intra-annual repartition of water exhibit different patterns. In year 2002, the irrigation campaign begins later. Most of the irrigation is concentrated in July.

4.4.1.3 Optimal land use in the baseline case

In the region considered, there are 6 crops produced by farmers, namely wheat, hard wheat, rape, corn, soybean and sunflower. In Figure 4.4, we have represented the regional optimal land resulting from the available annual water quotas. The predicted irrigated land is estimated to be 3971 ha, not too far away from the observed irrigated land in 2000 (4073 ha). See Appendix D.5.4 for detailed results. The model allows to correctly predict the irrigated land. Most of the

irrigated land is used for producing corn. The average regional irrigation intensity for corn is estimated to be 124 mm per ha. It varies from 98 mm per ha in 2002 to 164 mm per ha in 2003. These irrigation intensity levels are relevant for the area we consider.

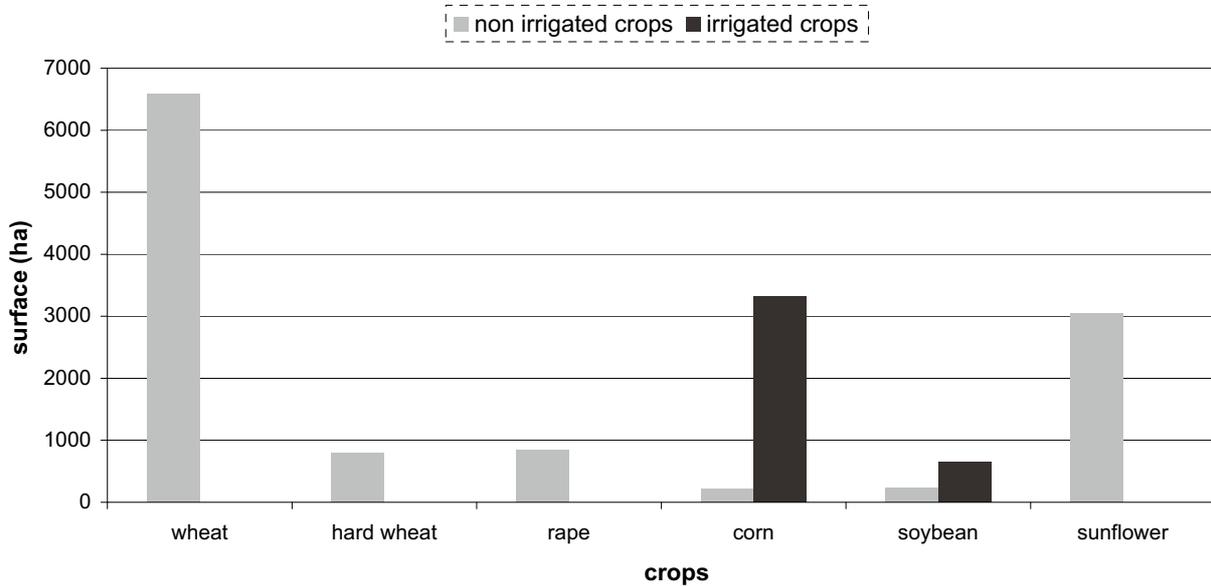


FIGURE 4.4 – Regional land allocation

Next, it is interesting to analyze how the model allocate land across crops for each type of farmers represented in uds 18.

TABLE 4.7 – Acreage allocation by type of farmer

type of farmer	land allocation (in ha)							
	wheat	hard wheat	rape	corn		soybean		sunflower
	non irrig.	non irrig.	non irrig.	non irrig.	irrig.	non irrig.	irrig.	non irrig.
<i>vsf</i>	0.98	-	-	0.15	0.07	-	-	0.85
C_{i-}^s	12.16	-	0.89	0.51	0.39	-	-	7.58
C_{i+}^s	6.10	1.03	-	-	12.46	-	3.62	5.39
C_{i-}^a	32.53	5.66	6.48	1.52	6.33	2.99	-	16.65
C_{i+}^a	19.74	3.03	2.88	0.76	22.60	-	9.94	5.18
C_{i-}^l	66.11	20.34	20.04	-	20.12	-	6.08	21.08
C_{i+}^l	38.19	11.77	5.87	-	68.75	-	9.06	-
M^s	6.20	-	-	-	1.73	-	-	3.66
M^a	12.92	-	-	0.35	7.62	-	-	6.16
M^l	22.50	8.39	9.53	3.59	29.47	11.00	-	12.60
<i>ofm</i>	3.49	-	-	-	1.08	-	-	1.38

The model allows to disaggregate regional data at the farm level. We identified eleven types of farms³⁸. We notice that units specialized in different farming activities depending of their type.

38. The farm-types are detailed in table 4.2 : very small farms (*vsf*), small cash crop farms with a low irrigation intensity (C_{i-}^s), small cash crop farms with a high irrigation intensity (C_{i+}^s), average cash crop farms with a low irrigation intensity (C_{i-}^a), average cash crop farms with a high irrigation intensity (C_{i+}^a), large cash crop farms with

Cash crop farms with a low irrigation effort (C_{i-}^s , C_{i-}^a , C_{i-}^l) mainly cultivate wheat, hard wheat and sunflower (non irrigated) when cash crop farms with a high irrigation intensity (C_{i+}^s , C_{i+}^a , C_{i+}^l) mainly cultivate irrigated corn and soybean. These results may be explained both by the irrigation equipment and the soils on which crops are cultivated. For example, farms C_{i-}^s , C_{i-}^a and C_{i-}^l are endowed with inappropriate land for irrigated crops, more relevant for non-irrigated wheat or sunflower (e.g. *hilly soils on smooth slopes*). Farms C_{i+}^s , C_{i+}^a , C_{i+}^l cultivate suitable soils for irrigated corn and soybean (e.g. *old alluvium terraces*). Results suggest that small and average mixed farms (M^s , M^a) are predominantly dedicated to livestock farming whereas large ones (M^l) are rather crop oriented farms. Total cultivated land represents on average 11.59 ha for M^s farms and 27.05 ha for M^a farms. On the other hand, M^l farms have a cultivated area of 97.08 ha, of which 29.47 are irrigated.

4.4.1.4 Optimal allocation of quotas in the baseline case

It is also interesting to analyze how the water quotas are allocated across farmer's types.

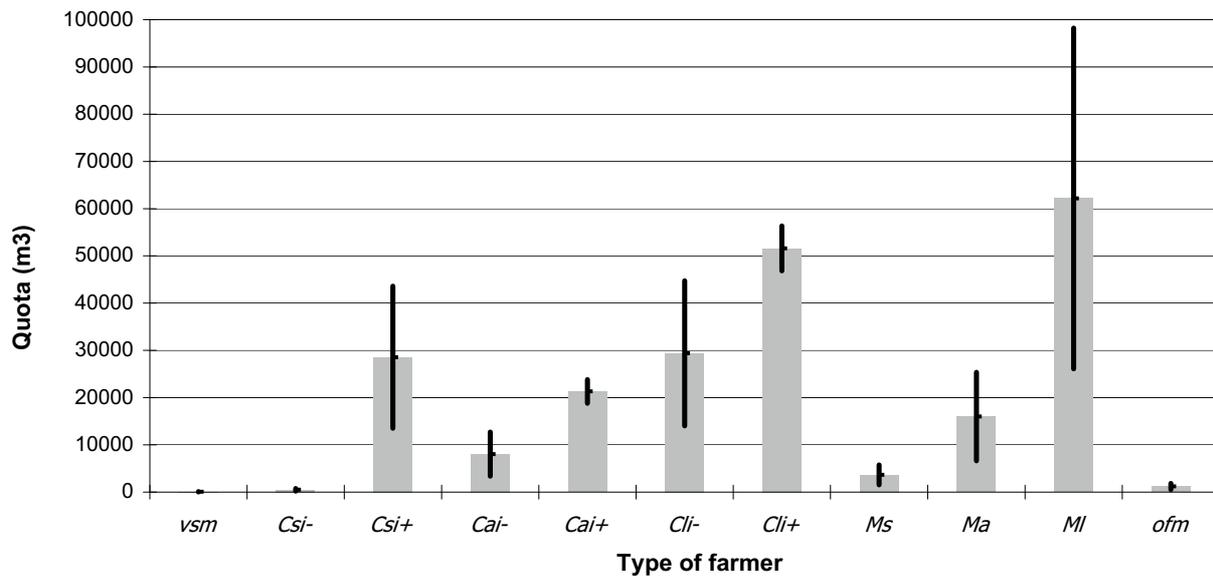


FIGURE 4.5 – Allocation of water by type of farmer (m³/farm unit)

Types C_{i+}^l and M^l are allocated on average more than 50,000 cubic meters of water per year (see figure 4.5). But both correspond to large economic size farms. Note that the dispersion of optimal allocated quota is high for a farm M^l when a farm C_{i+}^l has a homogenous amount of water across years (the black line is a graphical representation of the standard deviation). This

a low irrigation intensity (C_{i-}^l), large cash crop farms with a high irrigation intensity (C_{i+}^l), small mixed/livestock farms (M^s), average mixed/livestock farms (M^a), large mixed/livestock farms (M^l), others farms (*ofm*).

is explained by the relative heterogeneity / homogeneity of irrigation water needs for various climatic conditions. See table 4.8 for the 2000-2003 amounts of water applied for a corn crop by types C_{i+}^l and M^l .

TABLE 4.8 – Water needs are variable depending on years and types (corn crop)

Type of farm	irrigation (mm/ha)			
	2000	2001	2002	2003
C_{i+}^l	77	64	62	64
M^l	132	179	114	419

Figure 4.6 presents the average water applications at the field level for each type of farm. Grey bars give the irrigation by ha of irrigated land and black bars give the irrigation by ha of cultivated land.

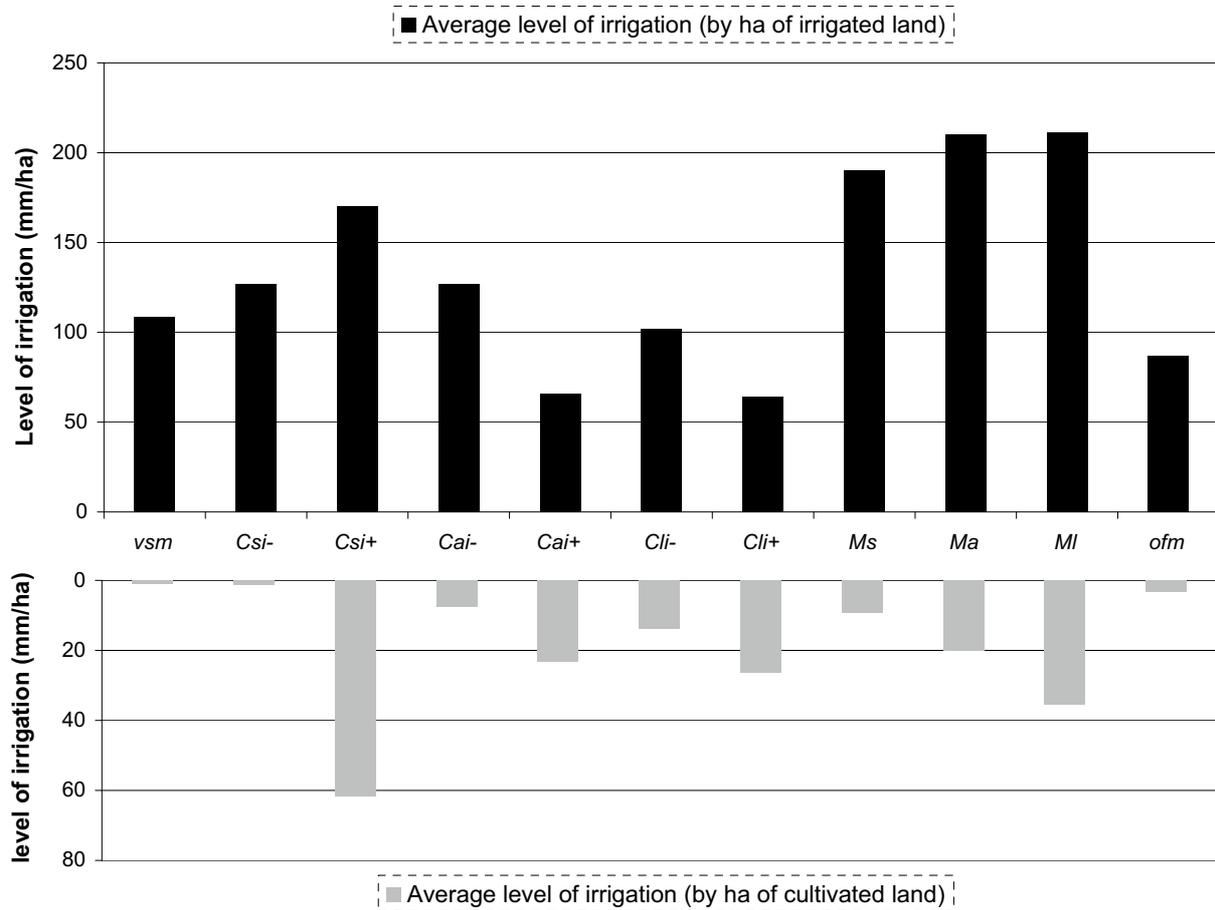


FIGURE 4.6 – Water allocation by type of farm (mm/ha)

We note that the per-hectare water supply of type C_{i+}^l (which gets the second largest individual water quota) is relatively low if we compare to the other farms. Considering the irrigation

level by hectare of irrigated land, this phenomenon is explained by the fact that the farm C_{i+}^l cultivates a significant surface of irrigated soybean (which is less water demanding than corn) when farms M^s , M^a or M^l only irrigate corn. Moreover, farms C_{i-}^s , C_{i-}^a , and C_{i-}^l (respectively small, average and large cash crop farms with a low irrigation intensity) supply on average more water on irrigated land than farm C_{i+}^l . They are actually endowed with a less convenient soil requiring more irrigation water to reach an equivalent crop yield. For instance, corn crop yields are on average equal to 8524 kg/ha for the type C_{i+}^l , 7449 kg/ha for the type C_{i-}^l , 6699 kg/ha for the type C_{i-}^a and 5245 kg/ha for the type C_{i-}^s (see table D.5.1 in appendix for other results). The model allocates the resource first to the more efficient farms (for example, a farm of type C_{i+}^l) and then to less efficient ones equalizing the marginal productivity of water across farms. These results suggest that farms C_{i-}^s , C_{i-}^a , and C_{i-}^l would be allocated a lower proportion of the available resource in a water shortage scenario (farm C_{i+}^l would get priority allocation because it uses water more efficiently).

The level of irrigation by hectare of cultivated land (that is, both irrigated and non irrigated) gives information about the relative importance of irrigation in the total agricultural activity. As expected, this irrigation level is lower for cash crop farms with a low irrigation intensity (C_{i-}^s , C_{i-}^a , C_{i-}^l) than for cash crop farms with a high irrigation intensity (C_{i+}^s , C_{i+}^a , C_{i+}^l). However, we note that the type C_{i+}^s uses significantly more irrigation water than the other types with regard to its average cultivated land. Water requirements for a corn crop are higher for the type C_{i+}^s than for other cash crop farms, a “soil effect” as was mentioned previously. See table 4.9 for detailed results.

TABLE 4.9 – Water needs are variable depending the soil (corn crop)

type of farm	irrigation (mm)	yield (kg/ha)	soil
C_{i+}^s	211	9173	recent alluvium
C_{i+}^a	67	8478	old alluvium terraces
C_{i+}^l	67	8534	old alluvium terraces

Figure 4.6 points out that mixed farms (M^s , M^a , M^l) may use irrigation as intensively as cash crop farms. But the level of irrigation by hectare of irrigated land should be interpreted carefully. M^s , M^a and M^l farms only irrigate corn (which is a high water demanding crop) while C_{i-}^s , C_{i-}^a and C_{i-}^l farms irrigate both corn and soybean (which is relatively less demanding). Regarding the level of irrigation by hectare of cultivated land, the diagram highlights that large mixed farms practice intensive irrigated farming. This is a non obvious result since we could have expected an extensive farming system (for instance, combining livestock and dry or lightly

irrigated crops).

4.4.2 New allocation rules

We considered in section 4.4.1 an optimal water allocation and its impacts on land use : the resource was divided among farmers taking into account annual regional water availabilities and climate-dependent crop yields. Nevertheless, implementing a collective sharing of a stochastic resource requires to define simple allocation rules that can be easily enforced. We consider two allocation rules : a distribution of individual water quotas based on the agricultural land (each farm get a part of the regional water availabilities equal to the proportion of its cultivated surface in the total cultivated surface at the regional level) and a distribution of individual water quotas based on the irrigated land (each farm get a part of the regional water equal to the proportion of its irrigated surface in the total irrigated surface of the region).

4.4.2.1 Regional effects

Table 4.10 presents the impact of new allocation rules implementation on profit, coming from irrigated and non irrigated crops. Figures in parenthesis are their respective percentages in the total profit. The baseline case corresponds to an optimal use of land and water, as detailed in 4.4.1. Changes in profit were computed thanks to those we got in the baseline allocation.

TABLE 4.10 – Impact of the allocation rule on profit

	Profit (in thousand of euros)			change in profit (in percent)	
	baseline case	quota based on agri. land	quota based on irrig. land	quota based on agri. land	quota based on irrig. land
Profit (non irrig. land)	2600 (61%)	2956 (70%)	2364 (56%)	+12%	-10%
Profit (irrig. land)	1685 (39%)	1247 (30%)	1864 (44%)	-35%	+10%
Total profit	4285 (100%)	4204 (100%)	4228 (100%)	-2%	-1%

We note that non-irrigated agriculture provides a large part of the regional profit whatever the quota allocation rule implemented : it represents 61% of the total profit in the baseline case, 70% when quotas are allocated on a agricultural land basis and 56% when quotas are based on the irrigated surface. Therefore, profit coming from irrigated agriculture represents between 30% and 44% of the total profit. A new allocation rule leads to changes in profit given by irrigated and non-irrigated land (variations up to 35% in regard to the baseline case) but does not significantly

impact the overall profit. Farmers adapt land use choices according to their quota, re-allocating surface areas from irrigated to non-irrigated crops (mainly irrigated corn to non irrigated wheat) when water quotas are based on farmers' agricultural land and from non-irrigated to irrigated crops (mainly non irrigated wheat to irrigated soybean) when quotas are allocated on an irrigated land basis. See table D.5.5 in appendix D for more precise results.

This optimization process allows to balance the negative economic effects of a sub-optimal water allocation. Nevertheless, notice these results correspond to a framework in which the free disposal hypothesis is assumed (farmers can modify land and water uses across crops at no cost). Moreover, regional-level re-allocation may also imply re-allocations of the resource across farmers and then affect their individual profit. We examine the intra-type effects of the two allocation rules in section 4.4.2.2.

4.4.2.2 Intra-type effects

We study the impact of the allocation rules on water quota and profit for each type of farmer. Figure 4.7 gives a graphical representation of the relative variation of the individual quota in comparison with the baseline quota level. Figure 4.8 represents the relative variation of profit. Notice that both water sharing based on agricultural land and on irrigated land involve changes in quota and profit by type. Analyzing similarities between diagrams 4.7 and 4.8, we verify that water quota and profit vary in the same direction³⁹.

Farm types vsf , ofm , C_{i-}^s , C_{i-}^a and M^s take profit from a quota allocation rule based on the agricultural land (ie. the total area of cultivated land). They are all small -or very small- farms, except for C_{i-}^a which is an average-size farm. This is a non-obvious result since the largest units get most of the resource owing to their surface area. But types C_{i+}^l and M^l are precisely among those the water allotment affect. Types C_{i+}^s and C_{i+}^a also suffer a loss of profit. In the baseline case, the resource was mainly given to large farms or farms having an intensive use of irrigation, then allocating water on an agricultural land basis penalizes them. Note that observable gaps between increases (resp. decreases) in quota and profit allow to assess the relative inefficiency of this allocation rule. For example, an increase in the quota of more than 200% for type C_{i-}^s makes the profit increases of less than 10% while a decrease in quota of 75% for type C_{i+}^s makes the profit decreases of almost 30%. Water is clearly not shared in an economically optimal way.

A quota allocation rule based on the irrigated land impacts high irrigation cash crop farms

39. Except for type vsf when the quota is based on irrigated land (the gap between increase in water quota and decrease in profit remain very small). We remind that vsf corresponds to very small farms [ESU<8].

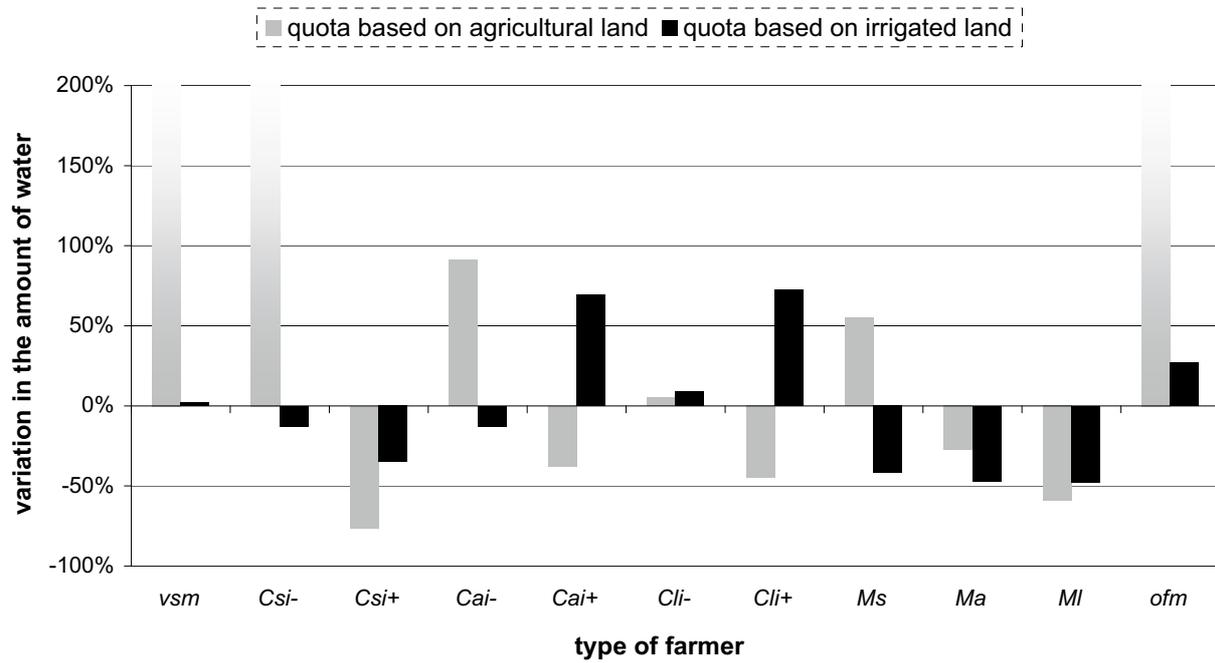


FIGURE 4.7 – Impact of a new water allocation rule on water quota for each type of farmer

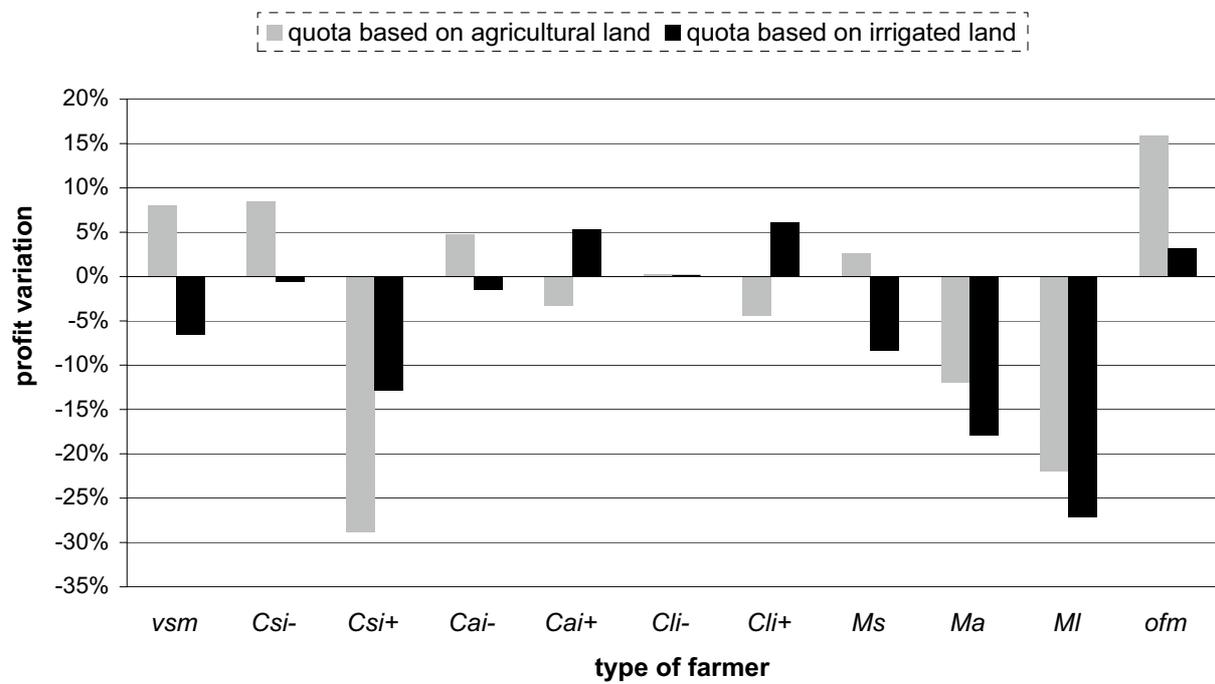


FIGURE 4.8 – Impact of a new water allocation rule on the profit for each type of farmer

and mixed/livestock farms. Others units are less affected. It may seem obvious that a water sharing based on irrigated land favors farms practicing an intensive irrigation. Profits increase by more than 5% for types C_{i+}^a and C_{i+}^l (average and large high irrigation intensity cash crop farms). But we surprisingly note that profit of farm-type C_{i+}^s (small, high irrigation intensity cash crop farms) decrease with this allocation rule. This result shows that C_{i+}^s units compensate for their small surface by intensive irrigation, above the average irrigation level of farm types C_{i+}^a or C_{i+}^l . We noted in section 4.4.1.4 that optimal allocation of water resource in the baseline case imply that a significant higher quota is given to the type C_{i+}^s , with respect to C_{i+}^a and C_{i+}^l (see table 4.9). This phenomenon is explained by the fact that farms C_{i+}^s cultivate irrigated corn on a recent alluvion soil when C_{i+}^a and C_{i+}^l cultivate irrigated crops on old alluvium terraces. The recent alluvium soil gives a higher yield but requires more irrigation water. This “soil effect” is a feature of the relevance of given soils to grow given crops. Considering the mixed/livestock farms, we note that the different units have a similar decrease in profit (figure 4.8) when the decrease in the allocated water quota is commensurate with the size of the farm (figure 4.7). Moreover, results suggest that small units (M^s) irrigate in the baseline case a smaller proportion of their available surface than others farms (M^a and M^l) but in a more intensive way (i.e. applying more water resource per hectare). Indeed, in comparison with the baseline case, type M^s get a higher quota when the allocation is based on the agricultural land and a lower one when the allocation is based on the irrigated land.

4.5 conclusion

In water scarcity situations, public authorities implement measures aiming to allocate the available water resource across users. But implementing a collective sharing of a stochastic resource requires to define simple allocation rules that can be easily enforced. This chapter has considered the problem of sharing water across heterogenous farmers located in a small agricultural region. An individual optimization model representing how farmers determine their land use and irrigation choices under climate uncertainty has been integrated in a regional water allocation model, maximizing the expected utility of agricultural profits generated by water use in each possible state of the nature. We proposed an original approach for the empirical application which consists in applying an optimization process on climatic-contingent agricultural production functions econometrically estimated from datasets generated by a biophysical model. This methodology had been used to evaluate economic scenarios as new water allocation rules. We

consider two allocation rules : a distribution of individual water quotas based on the agricultural land and an other based on the irrigated land. We note that non-irrigated agriculture provides a large proportion of the regional profit whatever the quota allocation rule implemented. Therefore, profit coming from irrigated agriculture represents a significant part of the total profit. A new allocation rule leads to changes in profit given by irrigated and non-irrigated crops but does not significantly impact the overall regional profit. Farmers adapt land use choices according to their quota, re-allocating surface areas from irrigated to non-irrigated crops (mainly irrigated corn to non irrigated wheat) when water quotas are based on farmers' agricultural land and from non-irrigated to irrigated crops (mainly non irrigated wheat to irrigated soybean) when quotas are allocated on an irrigated land basis. This optimization process allows to partially balance the negative economic effects of a sub-optimal water allocation at the regional level. However, a new sharing rule implies re-allocation of the resource across farmers and then affects their individual profit. Implementing an easily enforceable water sharing is thus a delicate political issue.

Annexe A

Calibrage du modèle de simulation agronomique (STICS)

A.1 Les caractéristiques du sol

Les propriétés du sol doivent être renseignées à partir de résultats d'analyse d'ordre physique, hydrique et chimique. Le calibrage a principalement été basé sur des études pédologiques réalisées par la CACG dans les années 1960-1970 (données mises à disposition par la Chambre d'Agriculture de Midi-Pyrénées). Les valeurs de certains paramètres ont cependant été spécifiées suivant des ordres de grandeur trouvés dans la littérature lorsque les données étaient manquantes (comme par exemple pour l'albédo ou le seuil d'humidité minimale pour les remontées capillaires). Les simulations ont été effectuées sur un sol aux caractéristiques décrites dans les tableaux B.1.2, B.1.3 et B.1.1 :

A.2 Les caractéristiques climatiques

On spécifie le climat à un pas de temps journalier : températures minimale et maximale (°C), rayonnement (MJ/m^2), pluie (mm) and ETP de Penman (mm). Les données météorologiques proviennent de la station d'Auch et ont été mises à disposition par le département d'agronomie

TABLE A.1.1 – Propriétés de l’horizon superficiel

Paramètres	Localisation
	Auch
. Teneur en argile de la couche de surface (%)	22.0
. Teneur en azote organique dans l’horizon d’humidification (% pondéral)	0.12
. Teneur en calcaire dans la couche de surface (%)	1.00
. Albédo du sol nu à l’état sec	0.20 ^a
. Limite d’évaporation de la phase potentielle d’évaporation du sol (mm)	0.00 ^b
. pH	7.00
. Fraction de la pluie ruisselée (between 0 and 1)	0.00

^a Ritchie (1972), Brisson & Perrier (1991).

^b G. Richard and P. Cellier - Notice Stics (1999).

TABLE A.1.2 – Propriétés du profil

Parameters	Localisation
	Auch (Gers)
. Profondeur d’humidification (cm)	35.00
. Concentration minimale du sol en NH4 protégée des lessivages ($\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$)	0.00
. Obstacle à l’enracinement (cm)	200
. Remontées capillaires ($\text{mm} \cdot \text{j}^{-1}$)	10.0
. Humidité minimale pour activation des remontées capillaires ($\text{g}^{\text{water}} / \text{g}^{\text{land}}$)	100.0
. Profondeur de l’imperméabilité (cm)	10

de l’Inra à Toulouse. Les simulations ont été réalisées sur trois scénarios climatiques (une année “sèche”, une année “pluvieuse”, une année “moyenne”) décrits par les figures B.1, B.2 et B.3.

A.3 Stades phénologiques de la plante

La définition des stades de développement de la plante est basée sur l’accumulation d’unités thermiques (AUT), c’est à dire la somme d’unités thermiques journalières calculée à partir de la moyenne des températures minimale et maximale du jour soustraite d’une température de base de 6 °C (Muchow et al., 1990). La simulation de la croissance d’une culture de maïs requiert de préciser les paramètres suivants⁴⁰ :

40. On notera que d’autres paramètres plus techniques doivent également être précisés.

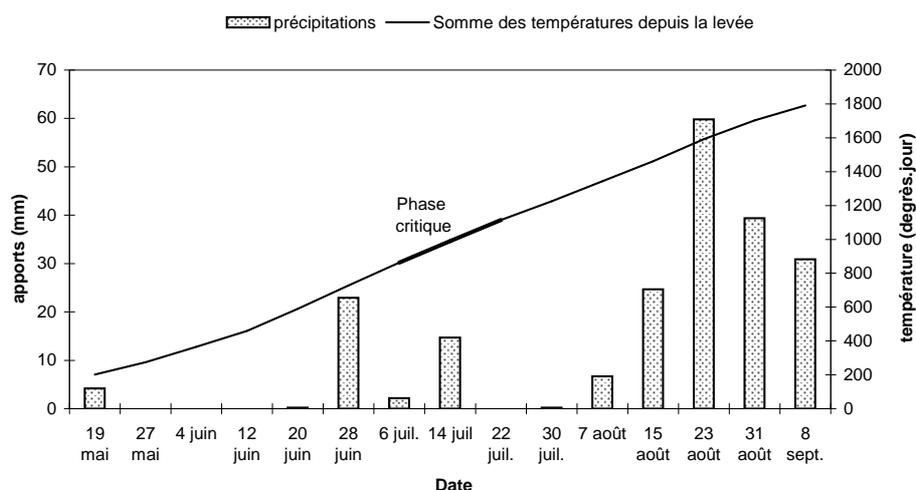


FIGURE A.1 – Caractéristiques climatiques de l'année sèche (1976)

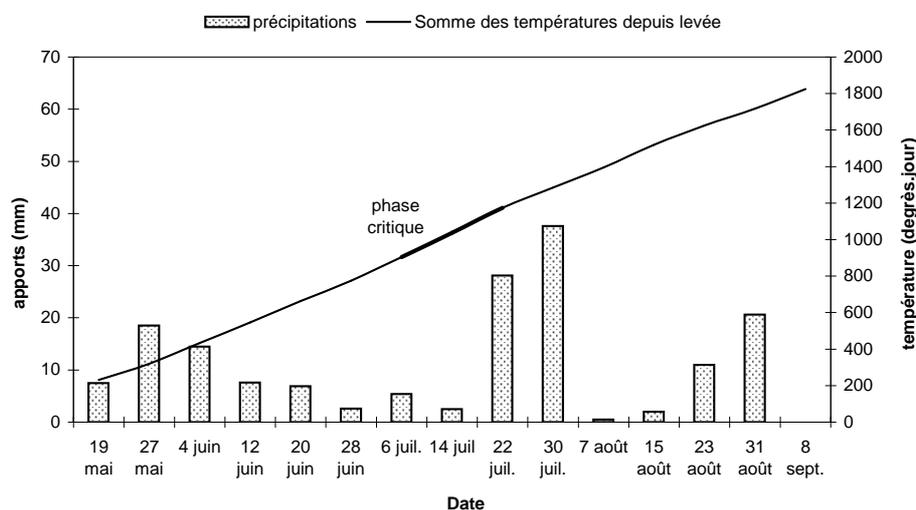


FIGURE A.2 – Caractéristiques climatiques de l'année moyenne (1982)

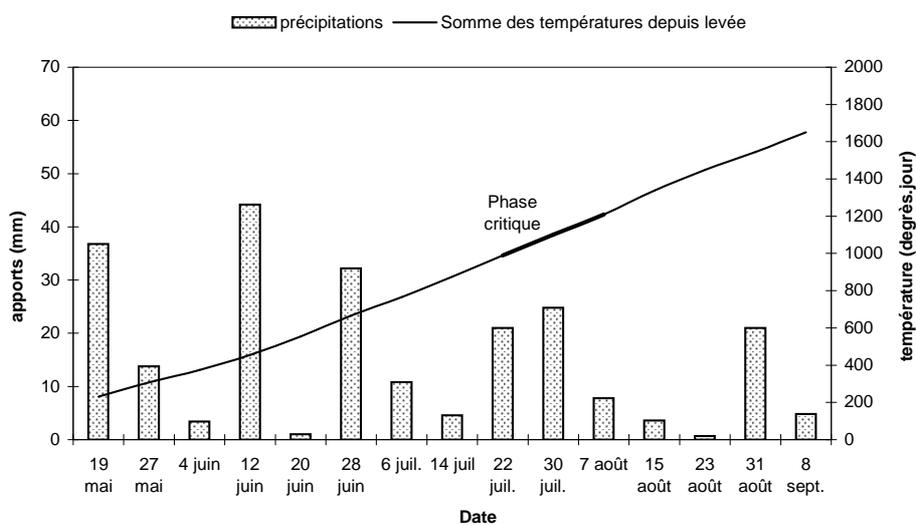


FIGURE A.3 – Caractéristiques climatiques de l'année pluvieuse (1988)

TABLE A.1.3 – Caractéristiques de l'hydrodynamique du sol

Épaisseur des horizons (cm)	Capacité au champ (g.g ⁻¹)	Humidité min. exploitable (g.g ⁻¹)	Densité apparente	Teneur en cailloux (%)	Type de cailloux	Infiltrabilité (mm/jour)
0-25	22.50 ^a	8.50 ^a	1.16 ^a	10.00	calcaire	50.00
25-55	25.40 ^a	11.60 ^a	1.29 ^a	10.00	calcaire	50.00
55-90	25.80 ^a	15.30 ^a	1.15 ^a	0.00	calcaire	50.00
90-120	28.70 ^a	19.00 ^a	0.91 ^a	5.00	calcaire	50.00
120-	0.00 ^a	0.00 ^a	0.00 ^a	0.00	calcaire	0.00

^a Jamagne & all (1977), Bastet & all (1998).

TABLE A.3.1 – Stades de développement (indice foliaire)

Stade de développement	AUT (degrés-jour)
Fin de la phase juvénile	275 [†]
Indice foliaire maximum	825 [†]
Début de la période de senescence	1588 [†]
Maturité physiologique	1785 [†]

[†]AUT à partir de la levée.

A.4 Itinéraire technique

Les grandes étapes de l'itinéraire cultural sont résumées dans le tableau suivant :

TABLE A.4.1 – Opérations culturales

Opération	Date (Jour julien)	Profondeur (cm)	Autres caractéristiques
Travail du sol	112	25	Les labours apportent des résidus organiques au sol. Ces résidus sont caractérisés par une quantité de matière fraîche (1 tonne/ha), une proportion en carbone (42%), et un rapport “Carbone/Azote” (60%).
Fertilisation	112	0	Une application de 200 kg/ha d’engrais (nitrate d’ammonium) est effectuée. Notons que dans le cas du maïs, on apporte également de l’azote minéral tout au long de la saison à partir de l’eau d’irrigation (concentration minérale paramétrée à 0.109999999 kgN/mm).
Semis	116	5	La densité de semis est fixée égale à 9,5 plants/m ² . La culture est une variété de maïs tardif ^a .
Récolte	-	-	La date de récolte est endogène et l’opération s’effectue lorsque Eau(grain)<0319999993 g/g de matière fraîche. Une date butoir est fixée au 26 ou au 27 octobre (jour julien 300).

^a Une variété est définie par l’accumulation d’unités de développement (somme de degrés jours) entre les différents stades phénologiques (végétatif ou de remplissage), éventuellement multipliée par un facteur limitant photopériodique ou de vernalisation.

Annexe B

Annexes du chapitre 2

B.1 Calibrage du modèle de simulation agronomique (STICS)

B.1.1 Les caractéristiques du sol

Les propriétés du sol doivent être renseignées à partir de résultats d'analyse d'ordre physique, hydrique et chimique. Le calibrage a principalement été basé sur des études pédologiques réalisées par la Compagnie d'Aménagement des Côteaux de Gascogne dans les années 1960-1970 (données mises à disposition par la Chambre d'Agriculture de Midi-Pyrénées). Les valeurs de certains paramètres ont cependant été spécifiées suivant des ordres de grandeur trouvés dans la littérature lorsque les données étaient manquantes (comme par exemple pour l'albédo ou le seuil d'humidité minimale pour les remontées capillaires). Les simulations ont été effectuées sur un sol aux caractéristiques décrites dans les tableaux B.1.1, B.1.3 et B.1.2 :

TABLE B.1.1 – Caractéristiques de l'hydrodynamique du sol

Épaisseur des horizons (cm)	Capacité au champ ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Humidité min. exploitable ($\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)	Densité apparente	Teneur en cailloux (%)	Type de cailloux	Infiltrabilité (mm/jour)
0-25	22.50 ^a	8.50 ^a	1.16 ^a	10.00	calcaire	50.00
25-55	25.40 ^a	11.60 ^a	1.29 ^a	10.00	calcaire	50.00
55-90	25.80 ^a	15.30 ^a	1.15 ^a	0.00	calcaire	50.00
90-120	28.70 ^a	19.00 ^a	0.91 ^a	5.00	calcaire	50.00
120-	0.00 ^a	0.00 ^a	0.00 ^a	0.00	calcaire	0.00

^a Jamagne & all (1977), Bastet & all (1998).

TABLE B.1.2 – Propriétés de l’horizon superficiel

Paramètres	Localisation
	Auch
. Teneur en argile de la couche de surface (%)	22.0
. Teneur en azote organique dans l’horizon d’humidification (% pondéral)	0.12
. Teneur en calcaire dans la couche de surface (%)	1.00
. Albédo du sol nu à l’état sec	0.20 ^a
. Limite d’évaporation de la phase potentielle d’évaporation du sol (mm)	0.00 ^b
. pH	7.00
. Fraction de la pluie ruisselée (between 0 and 1)	0.00

^a Ritchie (1972), Brisson & Perrier (1991).

^b G. Richard and P. Cellier - Notice Stics (1999).

TABLE B.1.3 – Propriétés du profil

Parameters	Localisation
	Auch (Gers)
. Profondeur d’humidification (cm)	35.00
. Concentration minimale du sol en NH4 protégée des lessivages ($\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$)	0.00
. Obstacle à l’enracinement (cm)	200
. Remontées capillaires ($\text{mm}\cdot\text{j}^{-1}$)	10.0
. Humidité minimale pour activation des remontées capillaires ($\text{g}^{\text{water}}/\text{g}^{\text{land}}$)	100.0
. Profondeur de l’imperméabilité (cm)	10

B.1.2 Les caractéristiques climatiques

On spécifie le climat à un pas de temps journalier : températures minimale et maximale (°C), rayonnement (MJ/m^2), pluie (mm) et ETP de Penman (mm). Les données météorologiques proviennent de la station d’Auch et ont été mises à disposition par le département d’agronomie de l’Inra à Toulouse. Les simulations ont été réalisées sur trois scénarios climatiques (une année “sèche”, une année “pluvieuse”, une année “moyenne”) décrits par les figures B.1, B.2 et B.3.

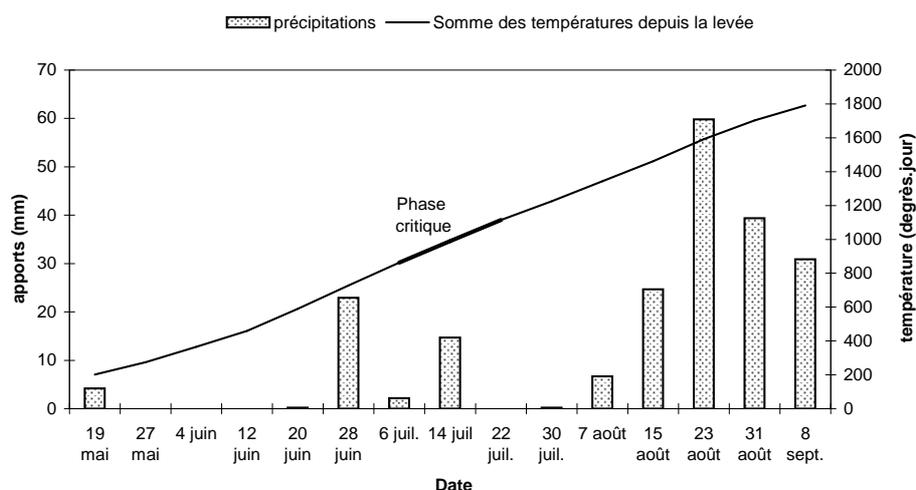


FIGURE B.1 – Caractéristiques climatiques de l'année sèche (1976)

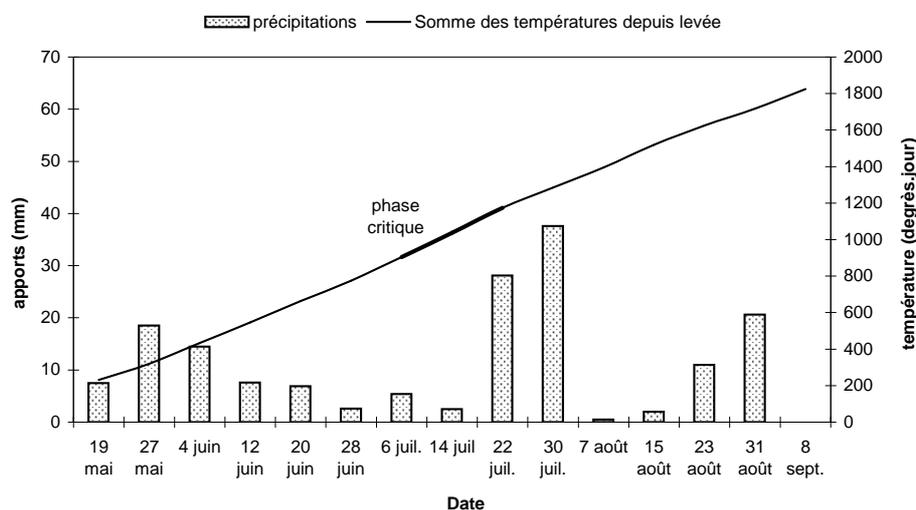


FIGURE B.2 – Caractéristiques climatiques de l'année moyenne (1982)

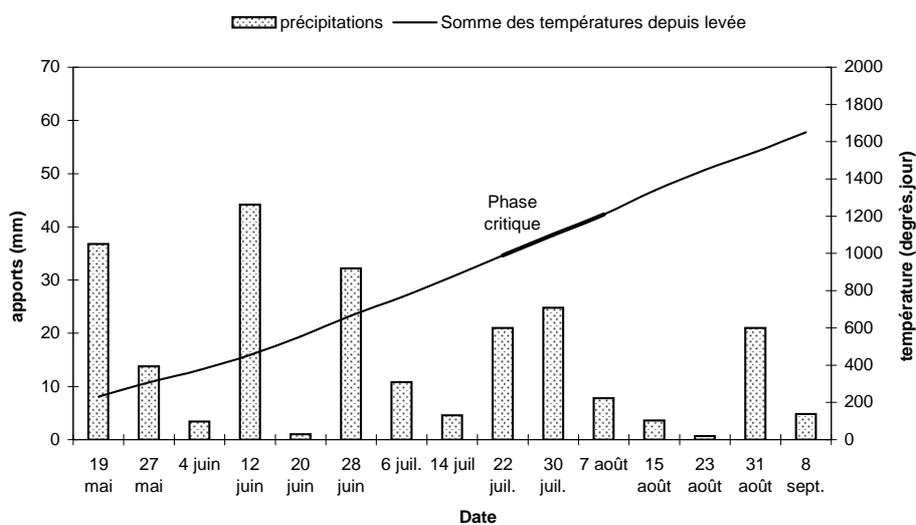


FIGURE B.3 – Caractéristiques climatiques de l'année pluvieuse (1988)

B.1.3 Stades phénologiques de la plante

La définition des stades de développement de la plante est basée sur l'accumulation d'unités thermiques (AUT), c'est à dire la somme d'unités thermiques journalières calculée à partir de la moyenne des températures minimale et maximale du jour soustraite d'une température de base de 6 °C (Muchow et al., 1990). La simulation de la croissance d'une culture de maïs requiert de préciser les paramètres suivants⁴¹ :

TABLE B.1.4 – Stades de développement (indice foliaire)

Stade de développement	AUT (degrés-jour)
Fin de la phase juvénile	275 [†]
Indice foliaire maximum	825 [†]
Début de la période de senescence	1588 [†]
Maturité physiologique	1785 [†]

[†]AUT à partir de la levée.

B.1.4 Itinéraire technique

Les grandes étapes de l'itinéraire cultural sont résumées dans le tableau suivant :

TABLE B.1.5 – Opérations culturales

Opération	Date (Jour julien)	Profondeur (cm)	Autres caractéristiques
Travail du sol	112	25	Les labours apportent des résidus organiques au sol. Ces résidus sont caractérisés par une quantité de matière fraîche (1 tonne/ha), une proportion en carbone (42%), et un rapport "Carbone/Azote" (60%).
Fertilisation	112	0	Une application de 200 kg/ha d'engrais (nitrate d'ammonium) est effectuée. Notons que dans le cas du maïs, on apporte également de l'azote minéral tout au long de la saison à partir de l'eau d'irrigation (concentration minérale paramétrée à 0.109999999 kgN/mm).
Semis	116	5	La densité de semis est fixée égale à 9,5 plants/m ² . La culture est une variété de maïs tardif ^a .
Récolte	-	-	La date de récolte est endogène et l'opération s'effectue lorsque Eau(grain)<0319999993 g/g de matière fraîche. Une date butoir est fixée au 26 ou au 27 octobre (jour julien 300).

^a Une variété est définie par l'accumulation d'unités de développement (somme de degrés jours) entre les différents stades phénologiques (végétatif ou de remplissage), éventuellement multipliée par un facteur limitant photopériodique ou de vernalisation.

41. On notera que d'autres paramètres plus techniques doivent également être précisés.

B.2 Résultats complémentaires

B.2.1 Année sèche

TABLE B.2.1 – Profits réalisables à partir d'une culture en sec ou irriguée avec $\bar{Q} = 30$ mm

Numéros stratégies	Dose par période (en mm/ha)															Rendement (kg/ha)	Profit (€/ha)
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15		
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3253	-464
2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	3253	-476
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	3253	-476
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	3255	-476
28	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	3301	-471
82	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	3369	-464
244	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	3687	-428
723	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	3832	-412
2011	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	3952	-399
5086	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	4184	-373
11672	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4154	-376
24556	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4189	-373
47962	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4062	-387
87982	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3731	-423
153064	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3616	-436
254557	30	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3516	-447

B.2.2 Année pluvieuse

B.2.2.1 Résultats à l'échelle d'une parcelle

Stratégies

TABLE B.2.2 – Espace de distribution discret

\bar{Q}	q_d^*	J_d^*	$\gamma_{j_d^*}$	π_d^*	λ_d
(mm/ha)	(mm/ha)	[<i>cf.</i> †]		(€/ha)	(€/mm)
0	0	1	1	30,59	2,43
10	0	1	1	30,59	
20	0	1	1	30,59	
30	30	4	1	98,23	2,25
40	30	4	1	98,23	
50	30	4	1	98,23	
60	60	1382	1	161,10	2,10
70	60	1382	1	161,10	
80	60	1382	1	161,10	
90	90	1176	1	232,96	2,40
100	90	1176	1	232,96	
110	90	1176	1	232,96	
120	120	1179	1	299,93	2,23
130	120	1179	1	299,93	
140	120	1179	1	299,93	
150	150	1188	1	342,15	1,41
160	150	1188	1	342,15	
170	150	1188	1	342,15	
180	150	1188	1	342,15	0
190	150	1188	1	342,15	
200	150	1188	1	342,15	
210	150	1188	1	342,15	0
220	150	1188	1	342,15	
230	150	1188	1	342,15	
240	150	1188	1	342,15	0
250	150	1188	1	342,15	
260	150	1188	1	342,15	
270	150	1188	1	342,15	0
280	150	1188	1	342,15	
290	150	1188	1	342,15	
300	150	1188	1	342,15	0

† Les stratégies sont détaillées dans l'annexe E.7.3.4.

Fonction de profit

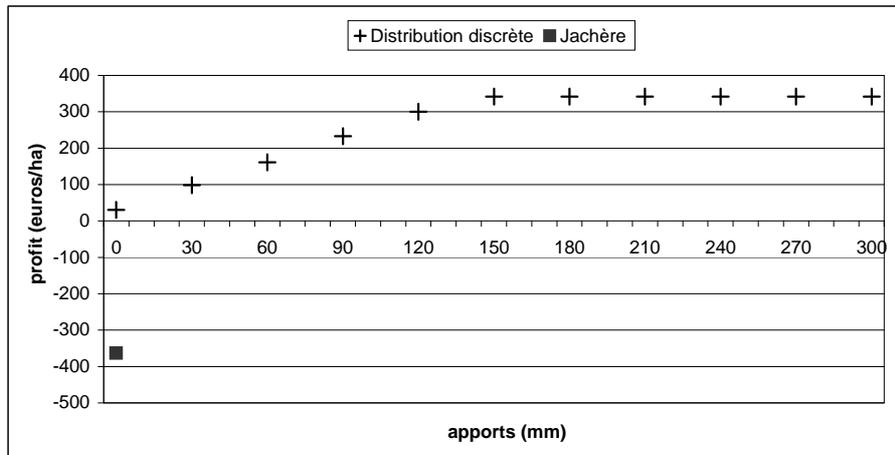


FIGURE B.4 – Profit à l'échelle d'une parcelle (année pluvieuse)

Fonction de demande

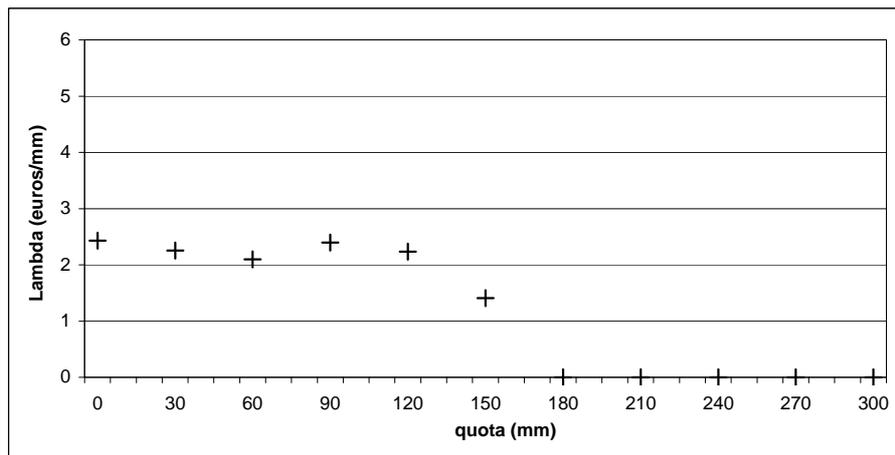


FIGURE B.5 – Demande à l'échelle d'une parcelle (année pluvieuse)

B.2.2.2 Résultats à l'échelle d'un territoire

Stratégies

TABLE B.2.3 – Espace de distribution continu

\bar{Q} (mm/ha)	q_c^* (mm/ha)	J_c^* [cf.†]	$\Gamma_{J_c^*}$	π_c^* (€/ha)	λ_c (€/mm)
0	0	1	1	30,59	2,43
10	10	1 4	0,67 0,33	53,14	2,26
20	20	4 1	0,67 0,33	75,68	2,25
30	30	4	1	98,23	2,26
40	40	4 1176	0,83 0,17	120,68	2,25
50	50	4 1176	0,67 0,33	143,14	2,25
60	60	4 1176	0,5 0,5	165,59	2,25
70	70	1176 4	0,67 0,33	188,05	2,25
80	80	1176 4	0,83 0,17	210,5	2,25
90	90	1176	1	232,96	2,25
100	100	1176 1179	0,67 0,33	255,28	2,23
110	110	1179 1176	0,67 0,33	277,61	2,23
120	120	1179	1	299,93	2,23
130	130	1179 1188	0,67 0,33	314,01	1,41
140	140	1188 1179	0,67 0,33	328,08	1,41
150	150	1188	1	342,15	1,41

† Les stratégies sont détaillées dans l'annexe E.7.3.4.

\bar{Q} (mm/ha)	q_c^* (mm/ha)	J_c^* [cf.†]	$\Gamma_{j_c^*}$	π_c^* (€/ha)	λ_c (€/mm)
160	150	1188	1	342,15	0
170	150	1188	1	342,15	0
180	150	1188	1	342,15	0
190	150	1188	1	342,15	0
200	150	1188	1	342,15	0
210	150	1188	1	342,15	0
220	150	1188	1	342,15	0
230	150	1188	1	342,15	0
240	150	1188	1	342,15	0
250	150	1188	1	342,15	0
260	150	1188	1	342,15	0
270	150	1188	1	342,15	0
280	150	1188	1	342,15	0
290	150	1188	1	342,15	0
300	150	1188	1	342,15	0

† Les stratégies sont détaillées dans l'annexe E.7.3.4.

Fonction de profit

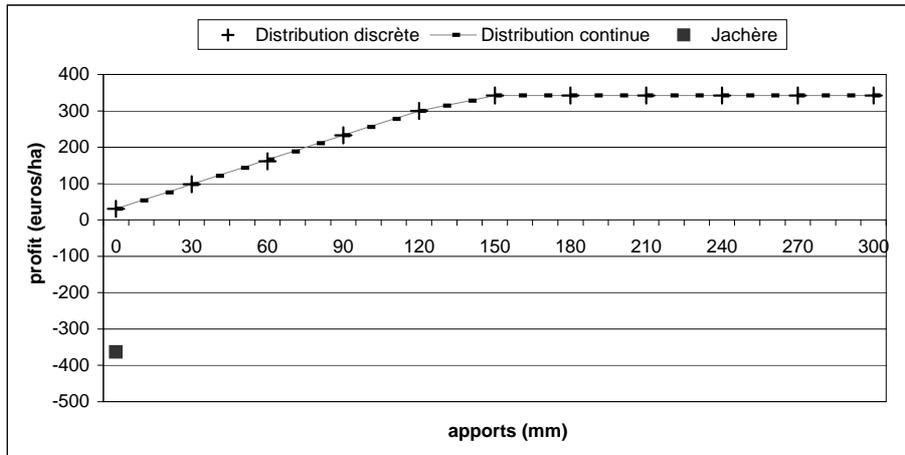


FIGURE B.6 – Profit à l'échelle d'un territoire (année pluvieuse)

Fonction de demande

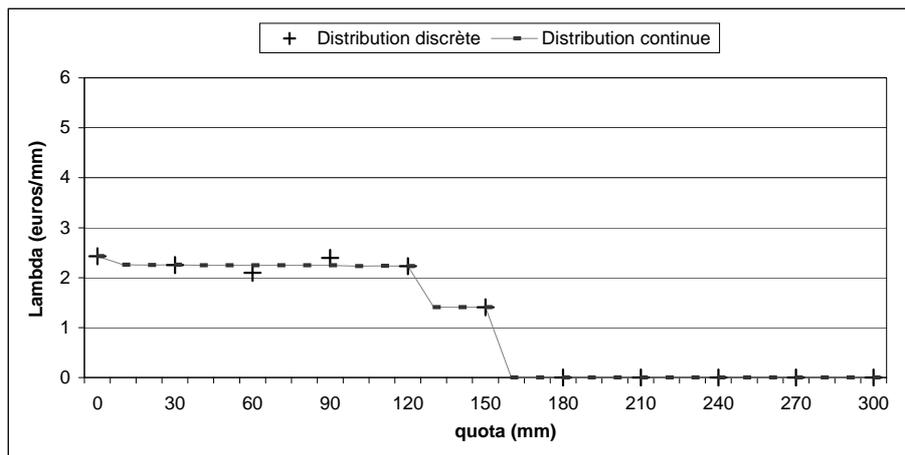


FIGURE B.7 – Demande à l'échelle d'un territoire (année pluvieuse)

B.2.3 Année moyenne

B.2.3.1 Résultats à l'échelle d'une parcelle

Stratégies

TABLE B.2.4 – Espace de distribution discret

Q	q_d^*	j_d^* [<i>cf.</i> [†]]	$\gamma_{j_d^*}$	π_d^*	λ_d
(mm/ha)	(mm/ha)			(€/ha)	(€/mm)
0	0	1	1	-353,69	2,73
10	0	1	1	-353,69	
20	0	1	1	-353,69	
30	30	244	1	-271,84	2,73
40	30	244	1	-271,84	
50	30	244	1	-271,84	
60	60	156497	1	-203,09	2,29
70	60	156497	1	-203,09	
80	60	156497	1	-203,09	
90	90	1046	1	-118,91	2,81
100	90	1046	1	-118,91	
110	90	1046	1	-118,91	
120	120	159929	1	-67,26	1,72
130	120	159929	1	-67,26	
140	120	159929	1	-67,26	
150	150	160340	1	2,72	2,33
160	150	160340	1	2,72	
170	150	160340	1	2,72	
180	180	261894	1	53,15	1,68
190	180	261894	1	53,15	
200	180	261894	1	53,15	
210	210	162366	1	100,37	1,57
220	210	162366	1	100,37	
230	210	162366	1	100,37	
240	240	159702	1	133,49	1,10
250	240	159702	1	133,49	
260	240	159702	1	133,49	
270	270	159774	1	146,85	0,45
280	270	159774	1	146,85	
290	270	159774	1	146,85	
300	270	159774	1	146,85	0

[†] Les stratégies sont détaillées dans l'annexe E.7.3.4.

Fonction de profit

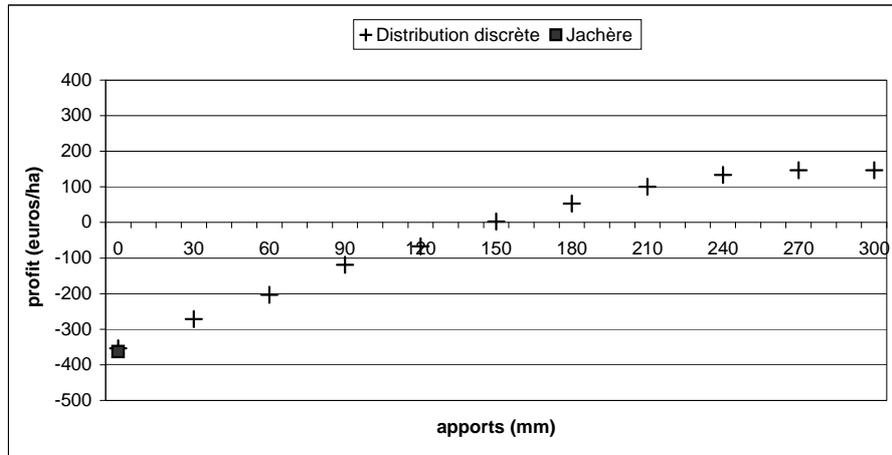


FIGURE B.8 – Profit à l'échelle d'une parcelle (année moyenne)

Fonction de demande

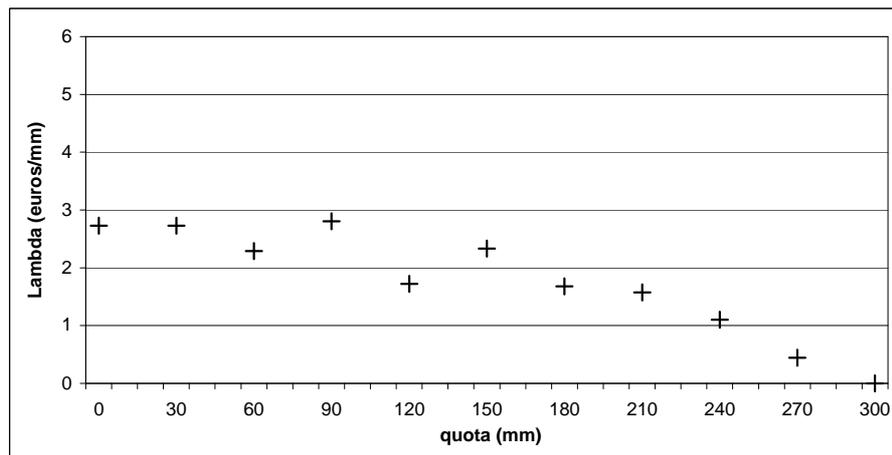


FIGURE B.9 – Demande à l'échelle d'une parcelle (année moyenne)

B.2.3.2 Résultats à l'échelle d'un territoire

Stratégies

TABLE B.2.5 – Espace de distribution continu

\bar{Q} (mm/ha)	q_c^* (mm/ha)	J_c^* [cf.†]	$\Gamma_{j_c^*}$	π_c^* (€/ha)	λ_c (€/mm)
0	0	1	1	-353,69	2,73
10	10	1 244	0,67 0,33	-326,41	2,73
20	20	244 1	0,67 0,33	-299,13	2,73
30	30	244	1	-271,84	2,73
40	40	244 1046	0,83 0,17	-246,36	2,55
50	50	244 1046	0,67 0,33	-220,87	2,55
60	60	244 1046	0,5 0,5	-195,38	2,55
70	70	1046 244	0,67 0,33	-169,89	2,55
80	80	1046 244	0,83 0,17	-144,4	2,55
90	90	1046	1	-118,91	2,55
100	100	1046 160340	0,83 0,17	-98,64	2,03
110	110	1046 160340	0,67 0,33	-78,37	2,03
120	120	1046 160340	0,5 0,5	-58,1	2,03
130	130	160340 1046	0,67 0,33	-37,83	2,03

† Les stratégies sont détaillées dans l'annexe E.7.3.4.

\bar{Q} (mm/ha)	q_c^* (mm/ha)	J_c^* [cf.†]	$\Gamma_{j_c^*}$	π_c^* (€/ha)	λ_c (€/mm)
140	140	160340 1046	0,83 0,17	-17,56	2,03
150	150	160340	1	2,72	2,03
160	160	16034 261894	0,67 0,33	19,53	1,68
170	170	261894 16034	0,67 0,33	36,34	1,68
180	180	261894	1	53,15	1,68
190	190	261894 16236	0,67 0,33	68,89	1,57
200	200	16236 261894	0,67 0,33	84,63	1,57
210	210	162366	1	100,37	1,57
220	220	162366 15970	0,67 0,33	111,41	1,1
230	230	15970 162366	0,67 0,33	122,45	1,1
240	240	159702	1	133,49	1,1
250	250	159702 159774	0,67 0,33	137,94	0,44
260	260	159774 15970	0,67 0,33	142,4	0,45
270	270	159774	1	146,85	0,44
280	270	159774	1	146,85	0
290	270	159774	1	146,85	0
300	270	159774	1	146,85	0

† Les stratégies sont détaillées dans l'annexe E.7.3.4.

Fonction de profit

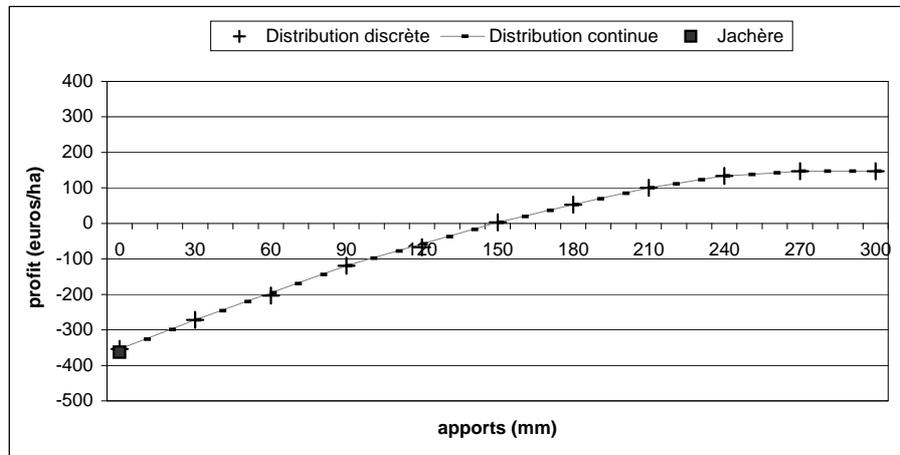


FIGURE B.10 – Profit à l'échelle d'un territoire (année moyenne)

Fonction de demande

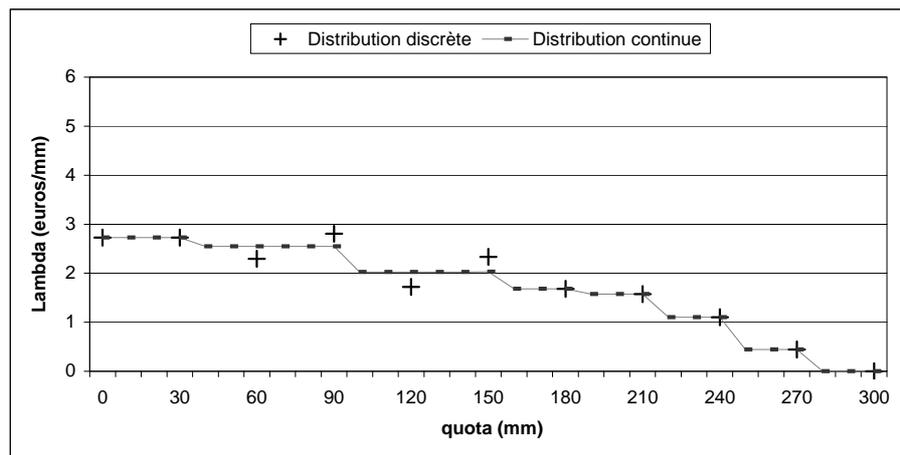


FIGURE B.11 – Demande à l'échelle d'un territoire (année moyenne)

B.2.4 Descriptif des stratégies utilisées

TABLE B.2.6 – Stratégies utilisées parmi les 407313 à disposition

Numéros stratégies	Dose par période (en mm/ha)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0
244	0	0	0	0	0	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0
1046	0	0	0	0	0	0	0	0	30	30	30	0	0	0	0
1176	0	0	0	0	0	0	0	0	30	60	0	0	0	0	0
1179	0	0	0	0	0	0	0	0	30	60	0	0	0	30	0
1188	0	0	0	0	0	0	0	0	30	60	0	0	30	30	0
1382	0	0	0	0	0	0	0	0	60	0	0	0	0	0	0
5745	0	0	0	0	0	0	30	0	30	0	0	0	0	0	0
6021	0	0	0	0	0	0	30	0	30	30	30	0	0	0	0
7956	0	0	0	0	0	0	30	60	0	60	0	0	0	30	30
15970	0	0	0	0	0	30	30	0	60	30	0	60	0	0	60
16034	0	0	0	0	0	30	30	0	60	60	30	60	0	0	0
37789	0	0	0	0	60	0	0	0	30	30	30	0	0	0	0
41916	0	0	0	0	60	0	60	0	0	30	30	0	0	0	0
41949	0	0	0	0	60	0	60	0	0	30	60	0	0	0	0
42971	0	0	0	0	60	0	60	60	30	30	0	0	0	0	0
42980	0	0	0	0	60	0	60	60	30	30	30	0	0	0	0
156497	0	30	0	0	0	0	30	0	0	0	0	0	0	0	0
159702	0	30	0	0	0	0	60	60	30	0	0	0	30	30	0
159774	0	30	0	0	0	0	60	60	60	0	0	0	30	30	0
159929	0	30	0	0	0	30	0	0	0	0	30	30	0	0	0
160340	0	30	0	0	0	30	0	0	30	0	0	60	0	0	0
162366	0	30	0	0	0	30	60	0	30	0	30	0	30	0	0
261894	30	0	0	0	0	30	0	0	30	0	60	0	30	0	0
407313	... ⟨ Jachère ⟩ ...														

Annexe C

Annexes du chapitre 3

C.1 Tarification de l'eau à objectif environnemental

C.1.1 Introduction

Face à la concurrence des besoins en eau des acteurs sociaux et des milieux naturels, les autorités publiques privilégient généralement l'emploi de mesures de restriction plutôt que des solutions décentralisées pour promouvoir la conservation des biens environnementaux (chapitre 3). Ainsi, la volonté de préserver le bon état écologique des milieux aquatiques peut amener le régulateur à imposer des contraintes de prélèvement dans les rivières en vue de maintenir un débit minimum pour l'écosystème. Mais une telle disposition conduit inévitablement à pénaliser fortement tous les usages non environnementaux, notamment en période d'étiage. L'irrigation en particulier, se voit contrainte dans les moments les plus critiques pour la croissance des cultures. Il en résulte que le respect strict de ce type de norme peut se traduire par des coûts très élevés pour les agriculteurs.

Une gouvernance économique du secteur de l'eau consiste à mener une politique de gestion qui permet à la société de profiter de tous les bénéfices générés par une répartition efficace de la ressource. Il s'agit de proposer un mode d'allocation qui prenne simultanément en compte le bien être lié à la protection de l'environnement et les surplus générés par des autres usages de l'eau (activité agricole). Dans la gamme des instruments à disposition d'un régulateur pour atteindre cet objectif, la tarification présente l'avantage de se substituer à des règles d'allocation plus autoritaires peu propices à réaliser une allocation socialement optimale. Un "juste" prix de l'eau (c'est-à-dire égal à sa valeur sociale⁴²) appliqué par les pouvoirs publics joue le rôle d'un signal de rareté envoyé aux consommateurs et permet ainsi de concilier leurs demandes respectives pour un niveau de disponibilité en ressource donné. A l'aide de ce système, les fonctions de demande n'ont pas besoin d'être identifiées. Notons cependant que lorsque la ressource est en partie destinée à assurer des utilisations "communes" telles que la protection de l'environnement, les tarifs doivent intégrer le coût d'opportunité des dommages écologiques induits par des prélèvements trop importants. Ce coût d'opportunité est égal à la valeur accordée par la société à l'environnement. On n'abordera pas ici les méthodes d'estimation de ces gains sociaux de protection de la nature ; la réalisation de telles évaluations réclamerait un travail d'investigation spécifique.

42. La valeur sociale peut être définie comme la somme de la rente de rareté de la ressource -coût marginal d'opportunité- et de son coût de fourniture à l'utilisateur.

C.1.2 Le modèle

C.1.2.1 Cadre d'analyse

Problématique

On suppose que la protection des potentialités écologiques des milieux aquatiques requiert qu'un débit minimum soit assuré dans les cours d'eau. Il en résulte des contraintes de prélèvement importantes qui impactent significativement sur les possibilités d'irriguer les cultures. En même temps, une gestion de l'eau économiquement efficiente réclame que le bien-être apporté par l'activité agricole soit aussi pris en considération par le régulateur. On étudie ce problème en considérant une rivière pour laquelle la conservation de l'écosystème suppose de maintenir continûment un débit circulant au dessus d'un certain seuil \bar{z} . Les flux "naturels" de ressource à chaque période t sont notés f_t et l'ensemble des prélèvements réalisés p_t . Il est possible de définir $\bar{p}_t = f_t - \bar{z}$, le seuil de prélèvement critique au delà duquel tout retrait supplémentaire de ressource est dommageable au milieu. Ainsi, une mesure de préservation de l'intégralité des usages écologiques -mais qui ignore le bien-être généré par toute autre utilisation- pourrait prendre la forme d'un débit réservé formalisé par la contrainte $p_t \leq \bar{p}_t$. L'autorité publique en charge de la gestion de la rivière souhaite maximiser le bien-être social "global", composé à la fois de bénéfices environnementaux et du surplus généré par l'irrigation : elle cherche par conséquent à effectuer le meilleur partage de la ressource réalisable, c'est-à-dire celui qui correspond à l'optimum social.

Hypothèses

Le cadre d'analyse est décrit par les hypothèses suivantes :

H1 : Usages L'analyse se focalise sur l'impact de la pratique de l'irrigation sur le milieu aquatique : seuls les usages agricoles et environnementaux de l'eau sont considérés. Ainsi, toutes les autres destinations envisageables de la ressource comme les villes ou l'industrie sont négligées. On suppose en outre que l'irrigant n'a pas accès aux ressources substitués telles que les réserves de surface (lacs, réservoirs) ou souterraines (nappes phréatiques ou profondes), et est par conséquent totalement soumis aux politiques environnementales de protection des écosystèmes. Enfin et pour simplifier, l'agriculteur est présumé prélever directement l'eau dans la rivière de telle sorte que les coûts de transport de la ressource (induits par l'aménagement d'interfaces de mise en disposition comme des canaux par exemple) sont nuls.

H2 : Dimension spatiale L'objet n'étant pas d'étudier le rôle joué par la répartition spatiale de la ressource, l'analyse est géographiquement restreinte en un point particulier du système hydrographique. Ce point est l'unique accès à la rivière, c'est-à-dire le lieu où sont effectués les prélèvements. De ce fait, les interactions spatiales de type amont/aval et les difficultés induites par les localisations des systèmes d'offres (interconnexion entre réseaux de surface) et de demandes (influence de l'amont sur l'aval) sont négligées.

H3 : Horizon On circonscrit l'analyse à des problématiques d'allocation de très court terme consistant à réaliser un partage optimal des disponibilités entre les différentes périodes de la saison. En ce sens, l'exploitation de la ressource n'oppose pas différentes échelles temporelles (intra ou inter-annuelles) comme cela pourrait être le cas dans une optique de développement durable : l'eau a un statut de ressource non renouvelable puisque les quantités non consommées à un instant donné s'écoulent et sont définitivement perdues. Notons que ce système fait abstraction de nombreux mécanismes de renouvellement des stocks d'eau douce (tel que le cycle hydrologique : évaporation, transport atmosphérique et précipitations) ; il ne constitue pour cela qu'un support de représentation partiel des phénomènes naturels mais est néanmoins adapté pour l'analyse économique de la gestion d'une rivière.

H4 : Prévisibilité des évènements On souhaite pouvoir comparer les incidences d'une tarification sur le comportement d'usage de l'eau avec celles induites par un système de limitations quantitatives. L'étude des politiques de restriction développée au chapitre 3 ayant été conduite en univers déterministe⁴³, on considère dans cette section un cadre d'analyse où les phénomènes naturels sont parfaitement anticipés par l'agriculteur. Les aspects aléatoires des fluctuations des disponibilités ne sont donc pas pris en considération, ce qui signifie que la dimension risquée de la gestion de la ressource est négligée.

H5 : Système de culture On considère le cas d'un irrigant optimisant l'usage de la ressource en situation de monoculture. L'agriculteur conserve toutefois le pouvoir de décider quelles sont les proportions de surface cultivée et irriguée. La technique d'irrigation utilisée est elle aussi pré-définie. Le raisonnement est par conséquent mené pour un système de production relativement rigide qui n'intègre pas tous les mécanismes d'adaptation et de substitution (détaillés en 1.1.1).

43. Un cadre déterministe avait été choisi dans le but d'isoler l'examen du problème de reprogrammation optimale du calendrier d'irrigation des difficultés liées à l'attitude de l'irrigant face au risque (aléas climatiques ou préfectoraux).

Notons cependant que le travail d'analyse conserve tout son intérêt. L'absence d'alternative au postulat d'une culture exclusive et imposée est certes une hypothèse forte qui conduit inévitablement à sous-estimer l'élasticité de la demande en eau d'irrigation (ou à surestimer la valeur qui lui est accordée par l'irrigant) ; mais la finalité de la recherche est d'exposer les conséquences d'une régulation sur les stratégies de comportement d'usage de la ressource adoptées par l'exploitant à court terme et non pas de fournir des résultats précis sur sa valorisation pour un environnement pédoclimatique et économique particulier.

Remarque 1 *La définition du système de culture est un aspect déterminant du mode d'allocation le plus approprié à l'analyse. Par exemple, une répartition de l'eau fondée sur un marché de droits aurait supposé de prendre en compte les mécanismes de spécialisation des exploitations agricoles. Une distribution de la ressource entre irrigants qui consiste à réaffecter les disponibilités à ceux qui les valorisent le plus conduit nécessairement les agriculteurs à modifier leurs choix de cultures et d'assolements (les transferts de droits s'accompagnent d'ajustements fonciers et culturaux). Le système de monoculture considéré dans ce chapitre exclu par conséquent tout recours aux solutions de marché.*

C.1.2.2 Le schéma tarifaire prescrit par le planificateur social

Le planificateur poursuit un objectif de maximisation du bien-être social en pratiquant une gestion décentralisée de la ressource. On expose tout d'abord son problème de maximisation. L'instrument économique de décentralisation est présenté dans un deuxième temps.

Le principe

Soit $U(z)$, avec $U' \geq 0$ et $U'' \leq 0$, la fonction de valeur "écologique" qui mesure l'intérêt accordée par la société à la protection de l'environnement aquatique. \bar{z} est le débit en-deça duquel l'écosystème de la rivière est menacé : pour que $U(\cdot)$ soit maximisé, il conviendrait alors d'interdire à l'irrigant d'effectuer des prélèvements supplémentaires dès que $z_t = f_t - p_t \leq \bar{z}$. Mais le planificateur social doit aussi prendre en compte le surplus agricole. En conséquence, plutôt que d'imposer le respect d'un débit minimum dans le cours d'eau, il met en place un système d'allocation décentralisé basé sur les valorisations de la ressource par chacun des usagers (l'agriculture et l'écosystème) : l'irrigant est libre d'effectuer des prélèvements quel que soit le flux dans la rivière mais doit s'acquitter annuellement du paiement d'une taxe "environnementale" qui est fonction d'une pénalité unitaire et des dommages environnementaux causés par l'ensemble des prélèvements p_t réalisés au-delà du seuil de prélèvement critique $\bar{p}_t = f_t - \bar{z}$. Ainsi, le coût

social d'un flux de ressource trop faible pour assurer les besoins de la nature est supporté par l'agriculteur préleveur. Celui-ci effectuera un prélèvement si une unité supplémentaire d'eau lui procure un profit marginal supérieur à la charge fiscale induite ; il choisira de ne pas réaliser de prélèvement dans le cas contraire. Cette solution alternative aux contraintes rigides de débits réservés garantie que la protection de l'écosystème et les autres utilisations de l'eau soient prises en compte simultanément.

L'instrument

Une forme réduite de la taxe supportée par l'irrigant est la suivante :

$$\mathcal{T} = v\mathcal{D} \quad \text{avec } v \in [0, 1] \quad (\text{C.1.1})$$

où \mathcal{T} est la taxe annuelle, v la proportion des dommages supportée par chaque agriculteur (pénalité fixée par le régulateur) et \mathcal{D} les dommages environnementaux induits par tous les retraits $p_t \geq \bar{p}_t$ effectués sur la saison. Or, $p_t = \sum_{j=1}^J \gamma_j \omega_{jt}$ (on rappelle que γ_j est la proportion de surface allouée à la stratégie j et ω_{jt} la quantité d'eau apportée par la stratégie j à la période t). Il est alors possible de proposer les formes suivantes :

$$\mathcal{D} = \sum_{t=1}^T \mathcal{D}_t \quad (\text{C.1.2})$$

avec

$$\mathcal{D}_t = \begin{cases} \left[\sum_{j=1}^J \gamma_j \omega_{jt} - \bar{p}_t \right]^2 & \text{si } p_t = \sum_{j=1}^J \gamma_j \omega_{jt} \geq \bar{p}_t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{C.1.3})$$

Le dommage total est égal à la somme des dommages de chaque période (équation C.1.2). La relation C.1.3 définit \mathcal{D}_t comme une fonction quadratique de la différence entre le seuil critique \bar{p}_t et le prélèvement effectif au delà de ce seuil. Ainsi, le dommage marginal induit par un prélèvement est d'autant plus fort que le débit de la rivière est faible.

On interprète $v\mathcal{D}_t$ comme le coût d'opportunité d'une dégradation de l'écosystème provoquée par les $p_t - \bar{p}_t$ unités d'eau retirées au-delà de \bar{p}_t à la période t : c'est l'équivalent monétaire de la désutilité sociale induite par la relative pénurie de ressource dans le milieu à ce moment-là. Ce coût écologique correspond à la charge de la taxe supportée par l'irrigant pour avoir prélevé $p_t \geq \bar{p}_t$. En ce sens, \bar{p}_t est un *seuil d'exonération fiscale par période* : comme le raisonnement est conduit en univers déterministe (c'est-à-dire que les flux naturels de ressource f_t sont connus), les $\bar{p}_t = f_t - \bar{z}_t$ s'apparentent à des prélèvements par période en-deça desquels aucune taxation

n'est appliquée. On note $\bar{P} = (\bar{p}_1, \dots, \bar{p}_t, \dots, \bar{p}_T)$ le vecteur de ces seuils limites.

D'après les relations C.1.1, C.1.2 et C.1.3, la taxe annuelle \mathcal{T} est alors :

$$\mathcal{T}(\bar{P}, \Omega, \Gamma^*) = \begin{cases} v \sum_{t=1}^T \left[\sum_{j=1}^J \gamma_j \omega_{jt} - \bar{p}_t \right]^2 & \text{si } \sum_{j=1}^J \gamma_j \omega_{jt} \geq \bar{p}_t \\ 0 & \text{sinon} \end{cases} \quad (\text{C.1.4})$$

ce qui peut aussi s'écrire :

$$\mathcal{T}(\bar{P}, \Omega, \Gamma^*) = v \sum_{t=1}^T \mathbb{I}_{\{\sum_{j=1}^J \gamma_j \omega_{jt} - \bar{p}_t > 0\}} \left[\sum_{j=1}^J \gamma_j \omega_{jt} - \bar{p}_t \right]^2 \quad (\text{C.1.5})$$

où $\Omega(J \times T)$ est la matrice des J plans d'irrigation réalisables $p_j = (\omega_{j1}, \dots, \omega_{jt}, \dots, \omega_{jT})$ et $\Gamma^* = (\gamma_1^*, \dots, \gamma_j^*, \dots, \gamma_J^*, \gamma_{J+1}^*)$ le vecteur des parts de surface γ_j allouées par l'agriculteur à chacune des stratégies j .

Puisque la fourniture de l'eau à l'agriculteur par les infrastructures de mises à disposition (installation de pompage par exemple) s'effectue à coût nul, sa valeur sociale est sa rente de rareté. A chaque période, celle-ci est égale au coût marginal d'opportunité d'une dégradation de l'environnement induite par le retrait d'une unité de ressource du milieu, c'est-à-dire $v\mathcal{D}_t$; $\mathcal{T}(\cdot)$ est par conséquent la somme des rentes de rareté de l'eau de chaque période. C'est à cette condition qu'elle permet de rétablir une allocation efficace.

C.1.2.3 Le programme d'optimisation de l'irriguant individuel

On conserve les notations qui ont été introduites dans le chapitre 2.

Fonction d'objectif La fonction d'objectif est le profit de l'agriculteur qui s'écrit :

$$\pi = \sum_{j=1}^J \gamma_j [py_j - \psi_j - \rho q_j - K^F] - \gamma_{J+1} K^F - \mathcal{T}(\bar{P}, \Omega, \Gamma^*) \quad (\text{C.1.6})$$

On rappelle que p est le prix de vente de la culture (en unité monétaire/unité de récolte), ρ celui de l'eau (en unité monétaire/unité de ressource), y_j le rendement généré par la stratégie j , $q_j = \sum_{t=1}^T \omega_{jt}$ la quantité totale d'eau apportée par la stratégie j sur les T périodes (en unité de ressource), ψ_j les autres charges de production supportées lorsque la stratégie j est appliquée (en unité monétaire), et K^F les charges foncières fixes (en unité monétaire). $\mathcal{T}(\bar{P}, \Omega, \Gamma^*)$ est le montant de la taxe que doit acquitter l'irriguant pour l'ensemble des prélèvements réalisés durant la saison au-delà des seuils d'exonération fiscale $\bar{P} = (\bar{p}_1, \dots, \bar{p}_t, \dots, \bar{p}_T)$.

Cette fonction d'objectif est paramétrée par le régulateur de façon à ce que la combinaison de stratégies qui est choisie par l'agriculteur soit celle qui maximise le surplus social : outre la pénalité v et les niveaux critiques du débit de la rivière $\bar{Z} = (\bar{z}_1, \dots, \bar{z}_t, \dots, \bar{z}_T)$, il décide aussi du prix courant de la ressource ρ et du quota global \bar{Q} .

Contraintes Trois contraintes sont spécifiées.

Premièrement,

$$\sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j q_j \leq \bar{Q} \quad (\text{C.1.7})$$

l'irrigant dispose d'un quota d'eau annuel limité \bar{Q} où $\bar{Q} \in \{Q_1, \dots, Q_k, \dots, Q_K\}$, les K niveaux de quotas pouvant être souscrits.

Deuxièmement,

$$\sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j = 1 \quad (\text{C.1.8})$$

une stratégie est appliquée sur chaque fraction du périmètre.

Troisièmement,

$$\gamma_j \geq 0 \quad (\text{C.1.9})$$

une stratégie j ne peut être appliquée que sur une superficie positive ou nulle.

Programme Le problème de l'irrigant suite à la régulation peut s'écrire :

$$\begin{aligned} \max_{\{\gamma_1, \dots, \gamma_J, \gamma_{J+1}\}} & \left(\sum_{j=1}^J \gamma_j [py_j - \psi_j - \rho q_j - K^F] - \gamma_{J+1} K^F \right. \\ & \left. - v \sum_{t=1}^T \mathbb{I}_{\{\sum_{j=1}^J \gamma_j \omega_{jt} - \bar{p}_t > 0\}} \left[\sum_{j=1}^J \gamma_j \omega_{jt} - \bar{p}_t \right]^2 \right) \end{aligned} \quad (\text{C.1.10})$$

$$s/c \quad \left\{ \begin{array}{ll} \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j q_j \leq \bar{Q} & (\lambda) \\ \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j = 1 & (\mu) \\ \gamma_j \geq 0 & (\eta_j) \end{array} \right.$$

L'agriculteur alloue le périmètre entre diverses stratégies j de façon à maximiser son profit. Rappelons que γ_j est la proportion du périmètre sur laquelle est appliquée la stratégie j ; les J premières stratégies sont des stratégies d'irrigation et la $J + 1^{ieme}$ une stratégie de mise en jachère.

On appelle (λ) , (μ) et (η_j) les multiplicateurs associés aux contraintes C.1.7, C.1.8 et C.1.9 : en particulier, λ représente la valeur d'une unité supplémentaire de ressource en eau disponible à n'importe quel moment de la saison (valeur marginale du quota) et μ celle d'une unité de surface supplémentaire pour cette saison-là (rente foncière).

C.1.2.4 Conditions nécessaires d'optimalité

Le lagrangien associé à ce problème est :

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & \sum_{j=1}^J \gamma_j [py_j - \psi_j - \rho q_j - K^F] - \gamma_{J+1} K^F - \delta \sum_{t=1}^T \mathbb{I}_{\{\sum_{j=1}^J \gamma_j \omega_{jt} - \bar{p}_t > 0\}} \left[\sum_{j=1}^J \gamma_j \omega_{jt} - \bar{p}_t \right]^2 \\ & + \lambda \left(\bar{Q} - \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j q_j \right) + \mu \left(1 - \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j \right) + \sum_{j=1}^{J+1} \eta_j \gamma_j \end{aligned}$$

Un programme optimal d'irrigation doit satisfaire les conditions suivantes :

$$\begin{aligned} \frac{\partial \mathcal{L}}{\partial \gamma_j} = 0 & \implies py_j - \psi_j - \rho q_j - 2\delta \sum_{t=1}^T \omega_{jt} \left[\sum_{j=1}^J \gamma_j q_j - \bar{p}_t \right] - \lambda q_j - \mu + \eta_j = 0 \\ & \text{si } \sum_{j=1}^J \gamma_j \omega_{jt} > \bar{p}_t \\ & \implies py_j - \psi_j - \rho q_j - \lambda q_j - \mu + \eta_j = 0 \quad \text{sinon} \end{aligned}$$

Par définition, $q_j = \sum_{t=1}^T \omega_{jt}$. D'après les conditions de Kuhn et Tucker, $\gamma_j \eta_j = 0$. Si la stratégie j est utilisée, $\gamma_j > 0$ et $\eta_j = 0$. On a alors :

$$py_j - \psi_j - \rho q_j = \lambda q_j + \mu \quad \text{si } \sum_{j=1}^J \gamma_j \omega_{jt} < \bar{p}_t \quad (\text{C.1.11})$$

$$py_j - \psi_j - \rho q_j = \lambda q_j + \mu + 2\delta q_j \left[\sum_{j=1}^J \gamma_j q_j - \sum_{t=1}^T \bar{p}_t \right] \quad \text{si } \sum_{j=1}^J \gamma_j \omega_{jt} \geq \bar{p}_t \quad (\text{C.1.12})$$

Ces conditions d'optimalité doivent nécessairement être vérifiées à tout instant. Elles décrivent le coût d'opportunité pour l'agriculteur de l'accès à la ressource.

Interprétation

$py_j - \psi_j - \rho q_j$ représente le profit associé à la stratégie j . λq_j est la valeur globale de la ressource consommée par cette stratégie (produit de la rente de rareté et de la quantité d'eau appliquée) et μ est la rente foncière ; dans l'équation (C.1.12), la partie égale à $2\delta q_j \left[\sum_{j=1}^J \gamma_j q_j - \sum_{t=1}^T \bar{p}_t \right]$ peut s'interpréter comme le coût d'opportunité global des seuils d'exonération fiscale \bar{p}_t -au delà desquels tout retrait supplémentaire est taxé- si la stratégie j est mise en œuvre (la relation $\sum_{j=1}^J \gamma_j q_j - \sum_{t=1}^T \bar{p}_t$ est la somme des dépassements effectués durant la saison).

Un problème d'arbitrage Le processus décisionnel du choix des stratégies est fondé sur l'arbitrage entre la maximisation du profit "brut" $py_j - \psi_j - \rho q_j$ et la minimisation du montant de la taxe $\mathcal{T}(\bar{P}, \Omega, \Gamma^*)$. Les stratégies sont combinées de façon à ce que l'allocation intra-annuelle de la somme des quantités d'eau apportées à la culture permet de limiter les dépassements de seuils d'exonération fiscale. Lorsque le seuil est atteint ou déjà dépassé, une unité supplémentaire de ressource est appliquée si le gain "brut" est supérieur à la taxe payée pour cet apport additionnel. Pour chacune des périodes, l'agriculteur prélève et irrigue jusqu'au point où la profitabilité marginale (hors taxe) de l'eau devient égale au montant marginal de la taxe associée au prélèvement supplémentaire réalisé. Par conséquent, l'introduction de la taxe peut rendre optimale l'utilisation de stratégies initialement jugées peu efficaces si celles-ci permettent de lisser la répartition du quota sur la saison. A l'optimum, la combinaison des stratégies $\Gamma^*(\cdot)$ est ainsi complexifiée vis-à-vis de celle associée à la situation régulée : l'exploitant ne combine pour un quota donné que des stratégies qui sont, *dans le cadre d'une situation régulée*, optimales pour différents niveaux de quota dans un espace de distribution discret. C'est le principe de convexification de la fonction de profit dérivé du lemme 2 lorsqu'une tarification est mise en œuvre. On distingue deux situations d'intérêt : celle où les seuils ne jouent pas et celle où le vecteur \bar{P}_t est contraignant vis-à-vis des besoins de l'exploitant.

L'irrigant n'est pas contraint par les seuils d'exonération fiscale Premièrement, lorsque les seuils ne jouent pas (équation (C.1.11)), l'agriculteur irrigue une proportion γ_j de la surface avec la stratégie j jusqu'au point où le profit qui lui est associé est égal à la somme de la valeur globale de la ressource et de la rente foncière pour cette stratégie. A cette relation valable pour

tout j correspond la meilleure distribution de stratégies réalisables $\Gamma = (\gamma_1, \gamma_2, \dots, \gamma_j, \gamma_{j+1})$: en effet, si $py_j - \psi_j - \rho q_j > \lambda q_j + \mu$, l'exploitant aurait intérêt à accroître la fraction de surface allouée à j ; si $py_j - \psi_j - \rho q_j < \lambda q_j + \mu$, l'exploitant aurait intérêt à la diminuer. Au point où $py_j - \psi_j - \rho q_j = \lambda q_j + \mu$, la profitabilité marginale de la stratégie j (accroissement du profit qui serait généré par sa mise en œuvre sur une unité de surface supplémentaire) est égale à zéro. Notons toutefois que la valeur de l'eau n'est pas nulle pour autant : même si la limite "écologique" du débit de la rivière n'est pas atteint, il subsiste la contrainte de quota global qui fait que la ressource ne peut être considérée comme abondante au sens où les disponibilités ne sont pas limitantes. La valeur de l'eau pour l'irrigation est par définition égale à son profit marginal net de toutes les autres charges ; celui-ci est décroissant avec le volume consommé -en vertu des rendements marginaux décroissants du facteur "eau"- jusqu'à un certain niveau de consommation où il devient nul. Mais si le quota global souscrit ou alloué est inférieur à ce niveau maximal de consommation (c'est-à-dire que la contrainte de quota est liante), la valeur de la ressource est égale à λ (le coût d'opportunité d'accès au quota).

L'irrigant est contraint par les seuils d'exonération fiscale Deuxièmement, lorsque les niveaux des \bar{p}_t sont contraignants vis-à-vis des besoins agricoles, (équation (C.1.12)), l'agriculteur irrigue une proportion γ_j de la surface avec la stratégie j jusqu'au point où le profit qui lui est associé, diminué du coût d'opportunité global des seuils d'exonération fiscale, est égal à la somme de la valeur globale de la ressource et de la rente foncière. En ce sens, la stratégie j est appliquée sur la surface jusqu'à ce qu'elle permette d'atteindre un certain profit, réduit par rapport à celui réalisé dans la situation où les seuils \bar{p}_t n'ont pas d'impact sur les niveaux de prélèvements effectifs p_t ($p_t < \bar{p}_t$). La différence entre ces deux profits s'identifie à la "rente de rareté d'accès" au flux d'eau en rivière, c'est-à-dire à la somme maximale que l'irrigant aurait été prêt à payer pour voir les \bar{p}_t relevés au-delà des retraits réalisées en situation régulée. La ressource est ainsi doublement rare vis-à-vis de l'utilisateur : d'une part, son accès peut être rendu coûteux par l'existence des seuils \bar{p}_t et d'autre part, elle est rationnée par le quota global \bar{Q} qui subsiste toujours. Notons toutefois que la possibilité de prélever au-delà de p_t moyennant le paiement d'une taxe suppose qu'au point où $py_j - \psi_j - \rho q_j = \lambda q_j + \mu + 2\delta q_j \left[\sum_{j=1}^J \gamma_j q_j - \sum_{t=1}^T \bar{p}_t \right]$, la réalisation d'un profit marginal net strictement positif ne peut être expliquée que par un quota global inférieur à la quantité d'eau correspondante au niveau optimal de consommation et non pas par un seuil de débit écologique fiscalement exonéré trop strict.

C.1.3 Application empirique

C.1.3.1 Caractéristiques de la régulation

Seuil d'exonération fiscale On considère le cas d'un seuil de prélèvement $\bar{p}_t = 20$ mm $\forall t$ (le seuil est supposé uniforme dans le temps pour faciliter l'interprétation des résultats numériques) en-deça duquel aucune pénalité n'est appliquée.

Montant de la pénalité Le niveau de v reflète la proportion de dommage que la société fait supporter à l'agriculteur. On considère une pénalité unitaire égale à 0,1 €/mm pour tout prélèvement de ressource effectué dans la rivière lorsque le débit est inférieur au niveau critique $\bar{z}_t = f_t - \bar{p}_t$. Rappelons que le montant total de la taxe payé par l'agriculteur est $v\mathcal{D}$ où \mathcal{D} représente la somme des dommages environnementaux induits par tous les retraits $p_t \geq \bar{p}_t$ effectués sur la saison.

C.1.3.2 Résultats et implications

Les résultats obtenus dans le cas de cette régulation sont présentés dans le tableau C.1.1.

Ce sont les meilleures combinaisons de stratégies pour lesquelles les conflits d'usage de la ressource sont résolus.

Interprétation des résultats numériques

On étudie dans un premier temps les résultats du tableau C.1.1 (obtenus pour un dispositif de taxation des prélèvements dans la rivière lorsque le flux $f_t \leq 20$ mm) en les comparant à ceux présentés dans le tableau 3.2 (correspondant à la situation non régulée). Les conséquences des modifications des choix de combinaison de stratégies sur la répartition intra-annuelle du quota d'eau souscrit sont analysées dans un deuxième temps (comparaison des figures 3.1, 3.2 et 3.3 avec les figures C.1, C.2 et C.3).

Optimum social, optimum privé et valeur de l'eau par période On constate tout d'abord que la mise en place de l'instrument tarifaire entraîne un accroissement du nombre de stratégies utilisées par l'agriculteur pour un quota donné. Par exemple, pour $\bar{Q} = 100$, la surface est irriguée à partir d'une seule stratégie en situation non régulée (n° 1084) et à partir de 3 stratégies différentes lorsque la ressource est tarifée (n° 546, 1084 et 1167); pour $\bar{Q} = 200$, seulement deux stratégies sont appliquées en situation non régulée (n° 1084 et 1193), alors que

TABLE C.1.1 – Taxation des prélèvements si $p_t \geq 20$ mm

Q	q^{c*}	J^{c*} [c.f.†]	γ_{jc^*}	π_c^*	T_c^*	λ_c
(mm/ha)	(mm/ha)			(€/ha)	(€/ha)	(€/mm)
0	0	9950	1	-363	0	2,72
10	10	1084	0,06	-335,75	0,00	2,72
20	20	1084	0,11	-308,51	0,00	2,72
30	30	1084	0,17	-281,26	0,00	2,72
40	40	1084	0,22	-254,02	0,00	2,72
50	50	1084	0,28	-226,77	0,00	2,72
60	60	1084	0,33	-199,53	0,00	2,72
70	70	546 1084 1167	0,05 0,30 0,04	-173,50	0,14	2,59
80	80	546 1084 1167	0,10 0,25 0,10	-147,60	0,14	2,59
90	90	546 1084 1167	0,16 0,19 0,15	-121,71	0,14	2,59
100	100	546 1084 1167	0,21 0,13 0,21	-95,81	0,14	2,59
110	110	546 1084 1167	0,27 0,08 0,26	-69,92	0,14	2,59
120	120	546 1084 1167	0,32 0,02 0,32	-44,02	0,14	2,59
130	130	546 1084 1167 1193	0,34 0,01 0,21 0,12	-18,30	0,19	2,57
140	140	546 1084 1167 1193	0,34 0,01 0,05 0,29	7,37	0,19	2,57
150	150	546 1084 1167 1193	0,35 0,01 0,00 0,35	32,28	1,52	2,36

† Les stratégies sont détaillées dans l'annexe C.3.1.

\bar{Q} (mm/ha)	q^{c*} (mm/ha)	J^{c*} [cf. †]	γ_{jc^*}	π_c^* (€/ha)	T_c^* (€/ha)	λ_c (€/mm)
160	160	546	0,38	54,45	5,56	2,09
		1076	0,01			
		1084	0,01			
		1193	0,37			
170	170	384	0,00	74,15	11,57	1,85
		546	0,40			
		1076	0,03			
		1193	0,38			
180	180	384	0,03	92,16	14,34	1,77
		546	0,37			
		626	0,05			
		1052	0,03			
		1076	0,11			
		1193	0,29			
190	190	384	0,07	109,53	16,57	1,72
		546	0,32			
		569	0,02			
		626	0,09			
		633	0,00			
		1052	0,07			
		1076	0,18			
		1193	0,18			
		200	200				384	0,09	125,98	23,36	1,53
546	0,30					
569	0,04					
626	0,09					
633	0,02					
1052	0,09					
1076	0,22					
1193	0,14					
210	210	546	0,28	138,85	26,94	1,16
		569	0,05			
		626	0,08			
		633	0,03			
		1052	0,10			
		1076	0,22			
		1193	0,14			
		1752	0,01			
		1820	0,08			
		1983	0,01			
220	220	546	0,12	150,31	26,03	1,14
		569	0,14			
		633	0,00			
		1052	0,10			
		1076	0,21			
		1193	0,14			
		1752	0,03			
		1820	0,07			
		1941	0,07			
		1983	0,12			

† Les stratégies sont détaillées dans l'annexe C.3.1.

\bar{Q} (mm/ha)	q^{c*} (mm/ha)	J^{c*} [cf. †]	$\gamma_{j^{c*}}$	π_c^* (€/ha)	T_c^* (€/ha)	λ_c (€/mm)					
230	230	569	0,12	160,81	32,87	0,91					
		633	0,07								
		1052	0,08								
		1076	0,17								
		1107	0,02								
		1175	0,05								
		1193	0,14								
		1820	0,08								
		1941	0,25								
		1983	0,03								
		240	240				569	0,09	168,75	44,99	0,37
633	0,06										
1052	0,04										
1107	0,12										
1114	0,00										
1175	0,18										
1193	0,14										
1820	0,04										
1941	0,33										
250	250			1052	0,03	172,33	45,52	0,23			
				1107	0,03						
		1114	0,08								
		1175	0,19								
		1193	0,15								
		1820	0,04								
		1941	0,26								
		1983	0,05								
		2001	0,00								
		2983	0,17								
		260	256	1052	0,01				172,88	53,80	0,00
1114	0,12										
1175	0,14										
1182	0,06										
1193	0,14										
1820	0,03										
1941	0,23										
2001	0,03										
2017	0,07										
2983	0,17										
270	256			1052	0,01	172,88	53,80	0,00			
		1114	0,12								
		1175	0,14								
		1182	0,06								
		1193	0,14								
		1820	0,03								
		1941	0,23								
		2001	0,03								
		2017	0,07								
		2983	0,17								

† Les stratégies sont détaillées dans l'annexe C.3.1.

\bar{Q} (mm/ha)	q^{c*} (mm/ha)	J^{c*} [cf.†]	γ_{jc^*}	π_c^* (€/ha)	T_c^* (€/ha)	λ_c (€/mm)
280	256	1052	0,01	172,88	53,80	0,00
		1114	0,12			
		1175	0,14			
		1182	0,06			
		1193	0,14			
		1820	0,03			
		1941	0,23			
		2001	0,03			
		2017	0,07			
		2983	0,17			
		290	256				1052	0,01	172,88	53,80	0,00
1114	0,12					
1175	0,14					
1182	0,06					
1193	0,14					
1820	0,03					
1941	0,23					
2001	0,03					
2017	0,07					
2983	0,17					
300	256			1052	0,01	172,88	53,80	0,00
		1114	0,12			
		1175	0,14			
		1182	0,06			
		1193	0,14			
		1820	0,03			
		1941	0,23			
		2001	0,03			
		2017	0,07			
		2983	0,17			

† Les stratégies sont détaillées dans l'annexe C.3.1.

8 sont sélectionnées par l'exploitant dans le cas où ses prélèvements sont soumis à la tarification (n° 384, 546, 569, 626, 633, 1052, 1076 et 1193) ; pour $\bar{Q} = 300$, on observe le même phénomène accentué (usage d'une unique stratégie dans la situation de référence -n° 1204- contre 10 dans le cas de la tarification -n° 1052, 1114, 1175, 1182, 1193, 1820, 1941, 2001, 2017 et 2983). Le fait qu'un grand nombre de stratégies est appliqué lorsqu'une régulation de la demande existe illustre que le comportement de l'exploitant ne se réduit pas toujours à choisir une stratégie (ou un couple de stratégies) pour un quota donné comme il aurait pu être présumé à partir des résultats du modèle de référence (qui n'intègre qu'une contrainte de stock). La prise en compte de la tarification -ou taxation environnementale- confirme l'écart existant entre l'optimum social (combinaison socialement optimale des stratégies) et privé (combinaison des stratégies qui est optimale du seul point de vue de l'agriculteur). On observe en outre que l'optimum social est beaucoup plus complexe que l'optimum privé : le processus d'optimisation conduit l'exploitant à minimiser les taxes marginales associées à chacune des stratégies qui sont appliquées. En effet, l'introduction du système de taxation ajoute une dimension supplémentaire au problème : l'irrigant réalise des combinaisons linéaires de stratégies pondérées en fonction des montants de taxes associées. Dans l'espace des doses possibles ($D = \{0, 60\}$), la maximisation du profit suppose l'usage de plusieurs stratégies (rappelons que le seuil de prélèvement critique $p_t = f_t - \bar{z} = 20$ mm). Ce mécanisme d'ajustement des combinaisons linéaires choisies (c'est-à-dire des proportions de surface allouées aux stratégies) fait apparaître la valeur accordée au temps par l'agriculteur : le coût supporté en dépassant le seuil d'exonération fiscale ($p_t \geq \bar{p}_t$) à une période t doit être équivalent à la valeur de la perte en rendement (récolte) qui aurait été induite par un apport d'eau limitée à une quantité \bar{p}_t à cette période là, la différence $p_t - \bar{p}_t$ étant appliquée ultérieurement ou postérieurement. Il en résulte que la valeur marginale de l'eau à cette période (ou "rente de rareté de la période") est égale à la variation de profit conséquente à ce report de ressource. Notons que le temps n'intervient que dans la fonction de rendement (et pas dans les coûts) : l'irréversibilité des stress sur le développement de la culture conduit l'exploitant à faire un arbitrage entre rendement physique (poids en grains) et charges financières (montant total de la taxe payée).

Une disposition à payer pour l'eau endogène au montant de la taxe Il est intéressant de noter que la régulation tarifaire n'entraîne pas une baisse de la quantité d'eau utilisée, ni une diminution de la proportion de surface qui est consacrée à une culture irriguée : pour $\bar{Q} = 100$ et $\bar{Q} = 200$, les quantités d'eau consommées $q^{c*}(\bar{Q})$ et la somme des parts de surface associées aux stratégies effectivement appliquées $\sum_j \gamma_j^{c*}(\bar{Q})$ sont les mêmes dans les situations régulée et non

régulée ; pour $\bar{Q} = 300$, les quantités d'eau apportées diffèrent mais pas fortement (256 contre 300 mm). En revanche, les dispositions à payer des exploitants pour bénéficier de ressources supplémentaires à l'échelle de la campagne divergent. Vis-à-vis du cadre de référence, la valeur du quota à la marge associée au système avec tarification est d'autant plus faible que celui-ci est élevé : pour $\bar{Q} = 10$, elle est certes équivalente ($\lambda_c = 2,72 \text{ €/mm}$) ; mais pour $\bar{Q} = 100$, elle est sensiblement réduite (λ_c est égal à $2,59 \text{ €/mm}$ si les prélèvements sont soumis à une tarification et à $2,72 \text{ €/mm}$ sinon) ; enfin, pour $\bar{Q} = 200$, l'écart devient très significatif ($1,53 \text{ €/mm}$ en situation régulée contre $2,72 \text{ €/mm}$ dans le cas contraire). Ce phénomène s'explique aisément : $\lambda(\bar{Q})$ est le prix d'accès à l'eau pour lequel l'irrigant choisirait spontanément de prélever \bar{Q} s'il devait s'acquitter de ce prix, compte tenu des charges qui pèsent déjà sur la ressource (le prix effectivement payé ρ en particulier). Or, la mise en place d'une tarification de ce type revient à surfacturer l'eau à certaines périodes. Ce surcoût détériore le profit, qui est égal à la somme maximale que l'exploitant serait disposé à payer *en plus* pour le quota \bar{Q} , c'est à dire $\lambda(\bar{Q}) \times \bar{Q}$. De ce fait, la valeur de $\lambda(\bar{Q})$ dépend du profit généré pour un quota \bar{Q} et est donc endogène au montant de la taxe. Comme le profit est une fonction concave de l'eau, le profit marginal est élevé pour un quota \bar{Q} petit : une hausse des coûts due à la taxe ne se traduit que par une baisse minimale de la rentabilité de la ressource ($\lambda(\bar{Q})$ n'est sensiblement pas diminué). Pour un grand quota \bar{Q} , le profit marginal est faible et l'effet de la taxe est plus caractérisé ($\lambda(\bar{Q})$ est fortement réduit).

Représentations graphiques

A partir des distributions de stratégies détaillées dans le tableau C.1.1, on peut dériver l'allocation intra-annuelle de la ressource disponible pour chacun des quotas $\bar{Q} = 100$, $\bar{Q} = 200$, $\bar{Q} = 300$ (figures C.1, C.2 et C.3).

Interprétation des représentations graphiques

Optimisation fiscale et rareté des périodes A partir de l'examen des graphes 3.1, 3.2, 3.3 d'une part et C.1, C.2, C.3 d'autres part, il est possible d'interpréter plus précisément les décisions de l'exploitant concernant la répartition du quota annuel sur la campagne. On constate tout d'abord que les allocations qui avaient été réalisées dans la situation de référence pour différents quotas se trouvent modifiées quand le système tarifaire préalablement décrit est mis en œuvre. Les quantités d'eau appliquées à chaque date sont plus faibles et la ressource est

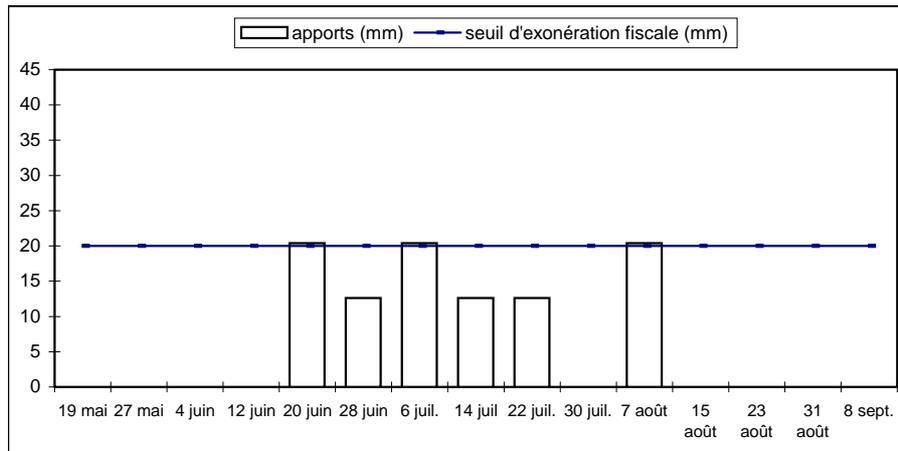


FIGURE C.1 – Allocation intra-annuelle pour un quota $\bar{Q} = 100$ (avec tarification)

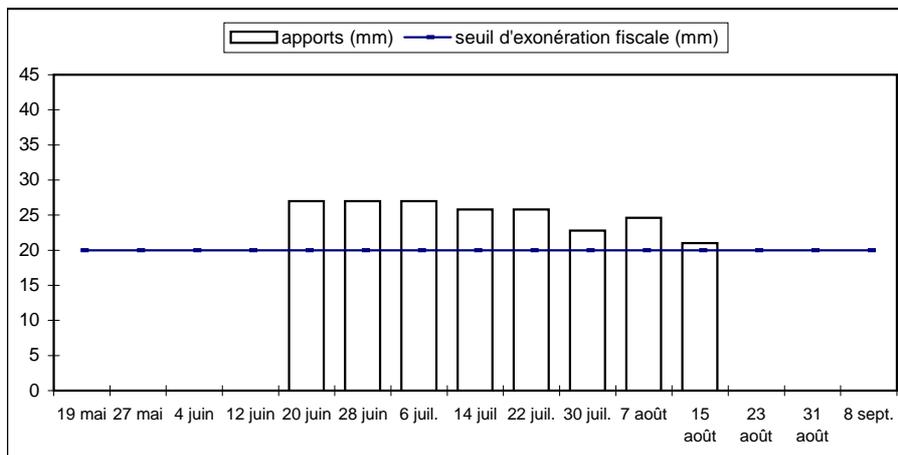


FIGURE C.2 – Allocation intra-annuelle pour un quota $\bar{Q} = 200$ (avec tarification)

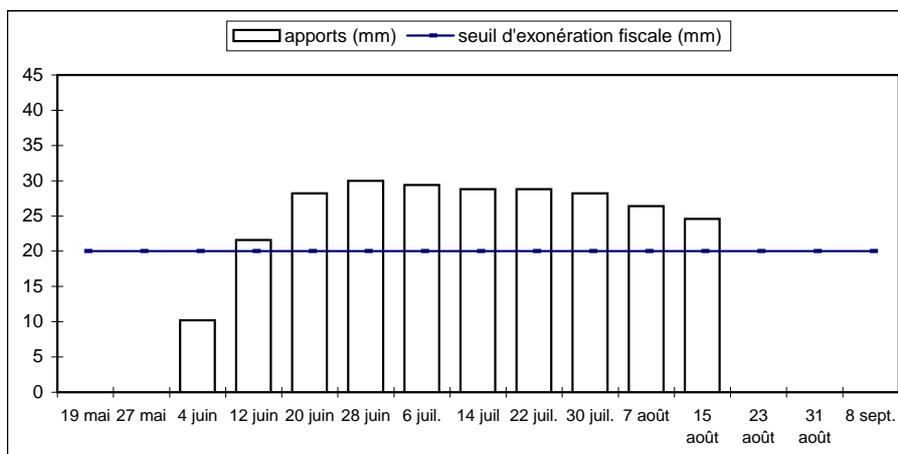


FIGURE C.3 – Allocation intra-annuelle pour un quota $\bar{Q} = 300$ (avec tarification)

distribuée sur davantage de périodes. Par exemple, pour $\bar{Q} = 100$, les apports s'effectuent aux périodes 5, 6, 7, 8, 9 et 11 et s'élèvent au maximum à 20 mm (alors qu'ils étaient uniformément de 33 mm aux périodes 5, 7 et 11); pour $\bar{Q} = 200$, l'agriculteur irrigue aux périodes 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11 et 12 en dépassant légèrement le seuil \bar{p}_t , mais avec des apports (de 21 à 27 mm) qui restent très inférieurs à ceux réalisés dans le cas standard (60 mm aux périodes 5 et 7, 40 mm à la période 11, 20 mm aux périodes 8 et 11); pour $\bar{Q} = 300$, le phénomène d'arrosage en continu est encore plus prononcé (10 apports de 10 à 29 mm entre les périodes 3 et 12 se substituent à 5 apports de 60 mm aux périodes 5, 7, 8, 10 et 11). Ces résultats montrent que le lissage est un moyen d'irriguer un intervalle donné en échappant à la taxe, à condition que le quota soit limité. En effet, réallouer l'eau sans dépasser le seuil écologique est d'autant plus facile que la quantité d'eau pouvant être prélevée est faible (par exemple, pour $\bar{Q} = 100$, les irrigations restent contenues sur les périodes 5 à 11). Dès que le quota est plus important, l'exploitant est confronté à une *rareté des périodes* auxquelles la ressource peut être apportée; celui-ci se voit alors contraint d'irriguer la culture plus précocément ou plus tardivement que dans le cas sans tarification, et éventuellement de s'acquitter de la taxe (pour $\bar{Q} = 200$ ou $\bar{Q} = 300$, les irrigations s'étalent sur des intervalles temporels plus étendus et sur lesquels le niveau des prélèvements est continûment supérieur au seuil d'exonération fiscale). Ainsi, lorsque le lissage ne permet pas à lui seul d'apporter la totalité du stock d'eau disponible, de nouvelles périodes -non irriguées dans un cadre non régulée- "contribuent" à l'épuisement du quota.

Valeur marginale de l'eau par période et allocation intra-annuelle de la ressource

Toutes les périodes ne s'équivalent pas. On remarque par exemple que pour un quota $\bar{Q} = 300$, l'agriculteur est plus disposé à supporter un surcoût lié à la taxe pour des irrigations réalisées avant l'intervalle initial des apports plutôt qu'après (les arrosages débutent plus tôt). Cette répartition s'explique par la *contribution au rendement* de l'eau aux différentes périodes⁴⁴ : l'agriculteur alloue en priorité la ressource aux périodes pour lesquelles une unité marginale d'eau procure l'accroissement du poids en grain à la récolte le plus important. Sa valeur marginale instantanée est alors égale à la perte de profit qui serait provoquée par l'apport d'une unité en moins à cette période ou encore au montant marginal de la taxe payée pour les $p_t - \bar{p}_t$ (si $p_t \geq \bar{p}_t$) millimètres retirées du fleuve à ce moment-là. Enfin, la visualisation globale des dépassements du seuil écologique -représentée par la droite des 20 mm- permet aussi d'apprécier la valorisation

44. On rappelle qu'il n'y a pas de coût fixe d'apport de la ressource au champs; ainsi, la meilleure répartition inter-temporelle d'une quantité d'eau donnée n'est déterminée que par l'arbitrage entre le rendement généré et le montant de la taxe associée à cette répartition.

du temps par l'irriguant : comme l'allocation de la ressource est celle qui maximise le profit, les pointes de consommation correspondent aux périodes pour lesquelles le stress hydrique de la plante est le plus dommageable. On peut décrire la règle d'attribution dans le temps du stock de ressource disponible de la façon suivante : l'exploitant octroie chaque unité d'eau à la période qui maximise la valeur marginale de celle-ci. La répartition s'effectue progressivement jusqu'à ce que la perte générée par l'apport d'une unité d'eau en moins à une période donnée ne puisse pas être compensée par le bénéfice supplémentaire d'une unité d'eau en plus appliquée à la plus "profitable" de toutes les autres périodes : l'allocation est alors optimale.

C.1.4 Conclusion

L'examen de la nouvelle répartition intra-annuelle de la ressource consécutive à la mise en place de la tarification de l'eau permet d'identifier trois éléments essentiels à la compréhension des comportements d'usage de l'irrigation par les agriculteurs.

Effet d'héritage La saison n'est pas composée d'une succession de périodes statiques indépendantes les unes des autres. Les processus physiques et biologiques de circulation de l'eau dans le sol et du développement de la plante impliquent au contraire une interdépendance forte entre les doses d'eau à appliquer à la culture au cours du temps. En ce sens, la politique d'irrigation est non markovienne parce que l'apport optimal en ressource à une période t dépend de tous les événements climatiques et apports effectués aux périodes précédentes : l'agriculteur "hérite" de caractéristiques agronomiques irréversibles qui sont la conséquence de l'histoire du végétal (des stress hydriques en particulier). Notons en outre que l'opportunité d'un apport en t est aussi fonction du climat futur -on raisonne dans un environnement déterministe- et des irrigations programmées aux périodes suivantes. Ce phénomène d'héritage est pris en compte par Stics : il détermine en partie l'allocation de l'eau réalisée par le programme d'optimisation économique.

Effet d'avancement Parmi les mécanismes physiques intégrés dans Stics, le fonctionnement du réservoir sol est l'un des plus susceptible d'influer sur les choix d'irrigation. La capacité et la vitesse auxquelles celui-ci se vidange est une contrainte pour l'exploitant qui peut le conduire à prendre des mesures préventives visant à devancer un manque d'eau ultérieur pour la culture. Plutôt que de stopper toute application de ressource lorsque la plante est non rationnée (c'est-à-dire que sa croissance *instantanée* n'est limitée par aucun stress hydrique), la dynamique du mouvement de l'eau dans le sol peut conduire l'agriculteur à poursuivre, voire amplifier ses

apports, en vue de futures phases de stress. Par anticipation du rythme auquel se vide le réservoir, la politique optimale consiste alors à le remplir avant que la contrainte qui lui est associée ne devienne liante, c'est-à-dire même si la valeur implicite de l'eau est nulle à ce moment-là. Cet effet d'avancement est le résultat d'une contrainte d'apport qui limite la quantité maximale d'eau pouvant être transférée dans le réservoir à un instant donné. Par exemple, un débit de l'équipement d'irrigation qui ne permettrait pas d'empêcher l'apparition de stress, même en arrosant en permanence au maximum, se traduirait par un coût d'opportunité de la contrainte de débit du matériel d'arrosage strictement positive. Dans le cas du système tarifaire considéré, il est clair qu'il peut être préférable d'irriguer prématurément le végétal -plutôt que de supporter le paiement d'une taxe "plus tard" pour dépassement du seuil d'exonération fiscale- si cela peut permettre de retarder les stress⁴⁵.

Effet de renoncement Dans certaines circonstances, le processus d'optimisation de l'agriculteur conduit plutôt à minimiser les coûts qu'à maximiser le rendement de la culture. Par exemple, ce phénomène se produit lorsque des contraintes institutionnelles imposent un usage limité de l'eau : allocation de quotas faibles, octroi de débits restrictifs, interdiction de l'irrigation. Même quand ces mesures sont temporaires, leur impact sur l'état physiologique des plantes est tel qu'il peut être préférable de ne pas pratiquer d'arrosages parce que les revenus qu'ils permettraient de générer à la récolte seraient inférieurs à leurs coûts. L'irréversibilité des stress hypothèque de toute façon le potentiel de rendement de la culture quels que soient les apports postérieurs à la phase de rationnement : en conséquence, l'eau perd de sa valeur et l'exploitant n'a plus intérêt à en faire usage. Dans le cas où une tarification est mise en place, le raisonnement est similaire : si le prix de l'accès à la ressource -d'une certaine quantité de ressource à une période "critique"- est trop élevé, il peut être profitable d'abandonner ou de réduire l'irrigation. Notons que les résultats issus de l'application empirique ont été obtenus dans un environnement déterministe ; à cause de cela, l'effet de renoncement se traduit non seulement par un non usage de l'irrigation mais aussi par la mise en jachère de la surface (dans les conditions pédo-climatiques considérées, la jachère est préférée à une culture en sec). En outre, comme il n'y a aucun coût fixe à irriguer par hypothèse, l'agriculteur utilise toujours la totalité du quota souscrit quand celui-ci est "petit", serait-ce pour l'appliquer sur une fraction infime de la superficie totale.

45. La seule contrainte à respecter est d'éviter les débordements dans le cas où le remplissage du réservoir dépasserait sa capacité de rétention.

C.2 Résultats d'interdictions de l'irrigation à différentes périodes

C.2.1 Phase d'arrêt 7

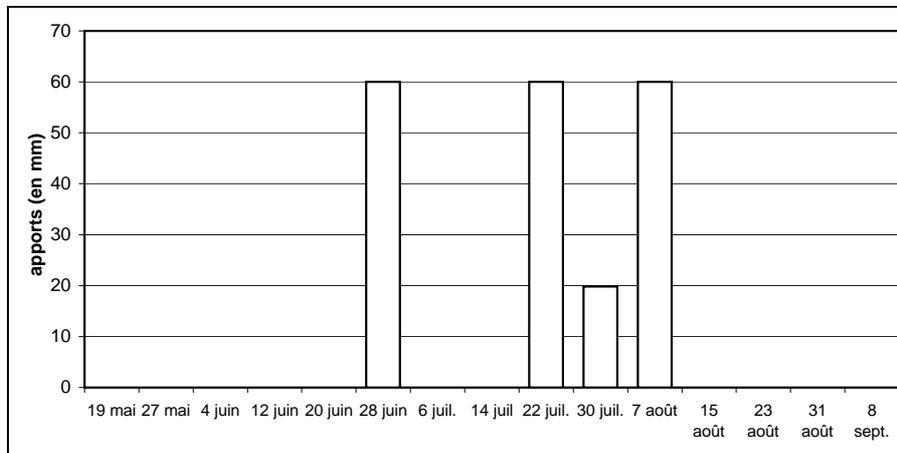


FIGURE C.4 – Allocation avec une interdiction d'arrosage du 2 au 18 juillet ($\bar{Q} = 200$)

C.2.2 Phase d'arrêt 10

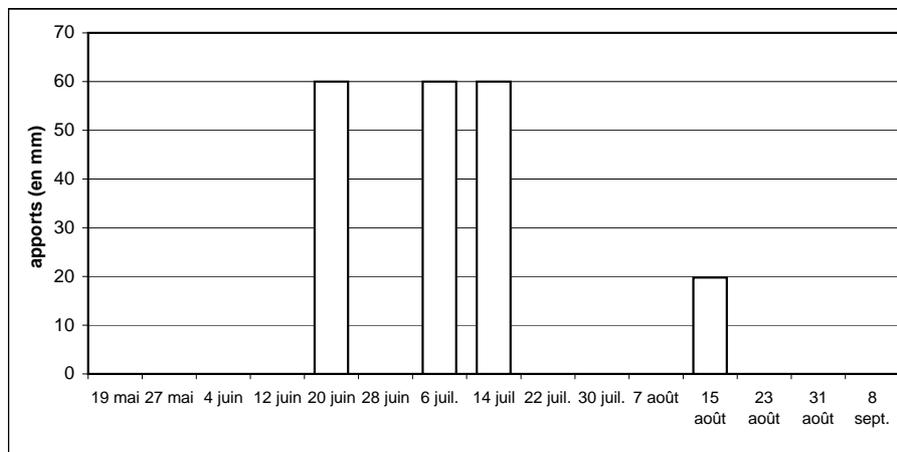


FIGURE C.5 – Allocation avec une interdiction d'arrosage du 26 juillet au 11 Août ($\bar{Q} = 200$)

C.3 Descriptif des stratégies

TABLE C.3.1 – Stratégies utilisées parmi les 9950 à disposition

Numéros stratégies	Dose par période (en mm/ha)														
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
384	0	0	0	0	0	0	60	60	0	0	60	0	0	0	0
414	0	0	0	0	0	0	60	60	0	60	60	0	0	0	0
546	0	0	0	0	0	60	0	0	60	0	60	0	0	0	0
569	0	0	0	0	0	60	0	0	60	60	0	60	0	0	0
576	0	0	0	0	0	60	0	0	60	60	60	0	0	0	0
626	0	0	0	0	0	60	0	60	0	60	0	60	0	0	0
633	0	0	0	0	0	60	0	60	0	60	60	0	0	0	0
769	0	0	0	0	0	60	60	0	60	60	0	0	0	0	0
1052	0	0	0	0	60	0	0	60	60	60	0	0	0	0	0
1076	0	0	0	0	60	0	60	0	0	0	0	60	0	0	0
1084	0	0	0	0	60	0	60	0	0	0	60	0	0	0	0
1107	0	0	0	0	60	0	60	0	0	60	0	60	0	0	0
1114	0	0	0	0	60	0	60	0	0	60	60	0	0	0	0
1167	0	0	0	0	60	0	60	60	0	0	0	0	0	0	0
1175	0	0	0	0	60	0	60	60	0	0	0	60	0	0	0
1182	0	0	0	0	60	0	60	60	0	0	60	0	0	0	0
1193	0	0	0	0	60	0	60	60	0	60	0	0	0	0	0
1204	0	0	0	0	60	0	60	60	0	60	60	0	0	0	0
1752	0	0	0	60	0	0	60	0	0	60	60	0	0	0	0
1820	0	0	0	60	0	0	60	60	0	0	60	0	0	0	0
1941	0	0	0	60	0	60	0	0	60	0	60	0	0	0	0
1983	0	0	0	60	0	60	0	60	0	0	60	0	0	0	0
2001	0	0	0	60	0	60	0	60	0	60	0	60	0	0	0
2017	0	0	0	60	0	60	0	60	60	0	0	60	0	0	0
2983	0	0	60	0	0	60	0	0	60	60	0	60	0	0	0
9950	... ⟨ Jachère ⟩ ...														

C.4 Descriptif des périodes

Période	Julien	Date	Période	Julien	Date	Période	Julien	Date
1	140	19-mai	6	180	28-juin	11	220	07-août
2	148	27-mai	7	188	06-juil	12	228	15-août
3	156	04-juin	8	196	14-juil	13	236	23-août
4	164	12-juin	9	204	22-juil	14	244	31-août
5	172	20-juin	10	212	30-juil	15	252	08-sept

Annexe D

Annexes du chapitre 4

D.1 The Neste system

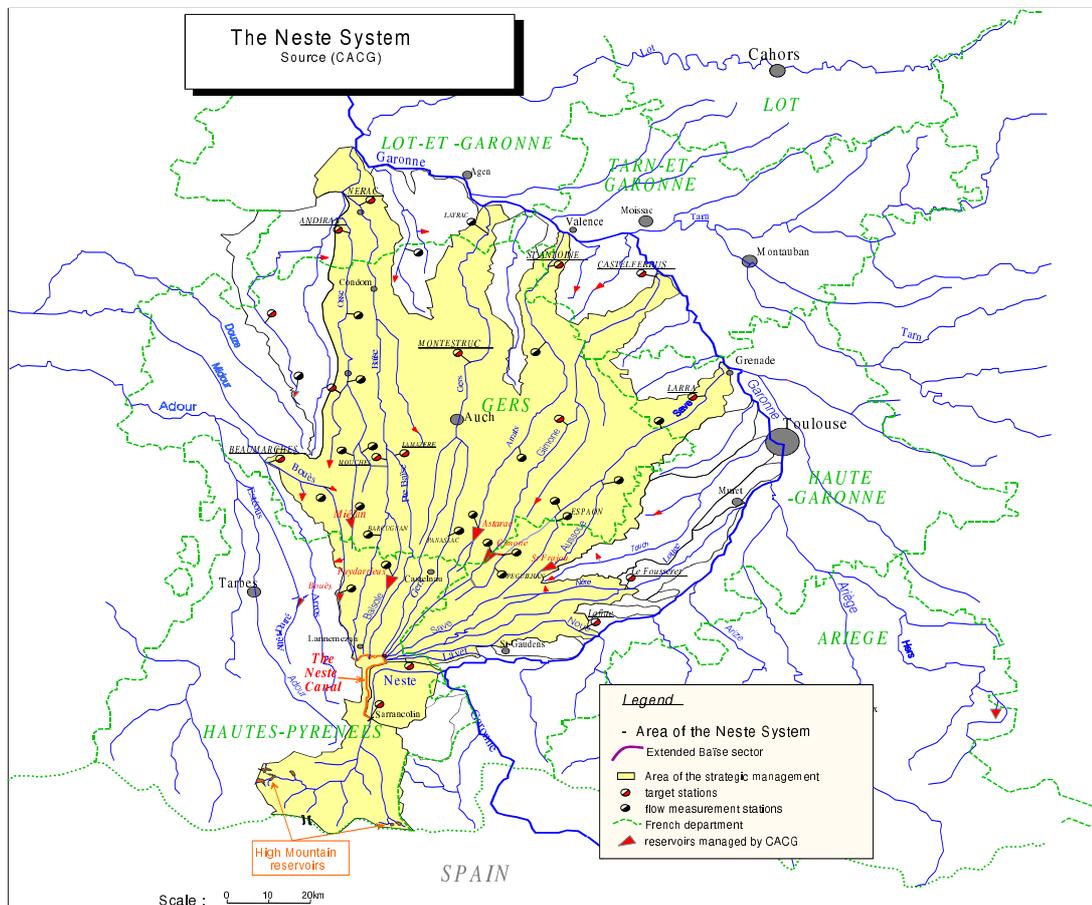


FIGURE D.1 – Map of the Neste system (France)

D.2 Cultural operations, soils and irrigation strategies

We stated cultural operations at the field level according to usual farmer's practices of tillage and soil preparation, fertilizer application and sowing. Agronomists observe standard farming activities throughout the season and define "schedules" summarizing the whole land farm process. Crop management includes in particular soil tillage with ploughing-in of residues (date, depth, quantity), sowing (date, depth, density, variety), mineral fertilization (date, depth, quantity, type of fertilizer) and harvesting (criteria used to define the suitable time). Notice that sowing date must be given as a parameter but harvesting date is an endogenous variable : crop maturity is defined by a maximal threshold for grain water content and is determined by the model⁴⁶.

46. When water content does not reach the reference threshold, the harvesting date is set to a cut-off date. This one is designed to take into account socioeconomic factors but has nothing to do with the physiological stage of

We stated soil profiles thanks to pedologic studies realized by CACG in the 1960's. The material provides information on granulometry (percent of sand, silt and clay found in soil samples), natural nutrient status (supplies of phosphorous, potassium, calcium and magnesium) and others fertility indicators as pH for each layer or horizon depth. Using this parameters set, the agronomical model Stics was calibrated with the view to be closed to each soil environment.

The irrigation season for all the crops (from April 22 to August 26) was divided into 15 identical periods ($T=15$), that is the number of dates for a water application. We assume that the farmer may choose the water doses $\omega_{jkt} = \{0, 25, 50\}$ at each date $t = \{7, 8, \dots, 15\}$ if the crop $k = \{\text{corn, soybean}\}$, $\omega_{jkt} = \{0, 10, 20\}$ at $t = \{7, 8, \dots, 13\}$ if $k = \{\text{sunflower}\}$ and $\omega_{jkt} = \{0, 15, 30\}$ at $t = \{2, 3, \dots, 7\}$ if $k = \{\text{wheat, hard wheat}\}$ ($t = 1$ is an irrigation period for the pea culture, not cultivated in the region 18). As a result, there are $3^9 = 19,683$ possible irrigation vectors for corn and soybean, $3^7 = 2187$ for sunflower and $3^6 = 729$ for bread wheat and hard.

D.3 Calibration of the plant growth model (STICS)

D.3.1 Soils characteristics

Soil parameters are known from chemical or physical analyses. Geologists from the *AGIR* department of agronomy, made the soil calibration. However, we also used parameter values found in the literature to complete missing data (as for albedo, potential soil evaporation threshold or minimal soil moisture threshold). Simulations were run on the soils presented in the following tables :

TABLE D.3.1 – Soils surface horizon properties

Parameters	Type of soil			
	Sandy clay	Clay loam	Silty clay loam	Silt loam
Surface-layer clay content (%)	30.00	40.00	40.00	16.00
Organic nitrogen content in the soil moisture horizon (%)	0.12	0.10	0.10	0.12
Surface layer limestone content (%)	8.00	0.00	0.00	0.00
Albedo when dry	0.20	0.20	0.25	0.20
Soil evaporation accumulation during the potential phase (mm)	6.00	7.00	7.00	8.00
pH	7.80	6.60	6.00	6.80
Run-off coefficient (between 0 and 1)	0.00	0.00	0.00	0.00

the crop.

TABLE D.3.2 – Full soils profile properties

Parameters	Type of soil			
	Sandy clay	Clay loam	Silty clay loam	Silt loam
Moisture depth (cm)	30.00	30.00	30.00	30.00
Mineral nitrogen concentration protected from leaching ($\text{kgN} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{mm}^{-1}$)	0.01	0.01	0.01	0.01
Depth of obstacles to rooting (cm)	146.00	100.00	47.00	98.00
Capillary rising ($\text{mm} \cdot \text{j}^{-1}$)	0.00	0.00	0.00	0.00
Minimal moisture to capillary rising ($\text{g}^{\text{water}} / \text{g}^{\text{land}}$)	1.00	1.00	1.00	1.00
Waterproof depth (cm)	10.00	10.00	10.00	10.00

D.3.2 Climate characteristics

Daily climatic data are required : minimum and maximum temperatures ($^{\circ}\text{C}$), radiation (MJ/m^2), rainfall (mm) and Penman PET (mm). Data used come from a weather station located near Auch (southwest of France). They have been made available by the Inra Department of Agronomy (AGIR). Simulations have been run for 10 climatic scenarios (1998-2007).

The weather scenarios are depicted in the following figures :

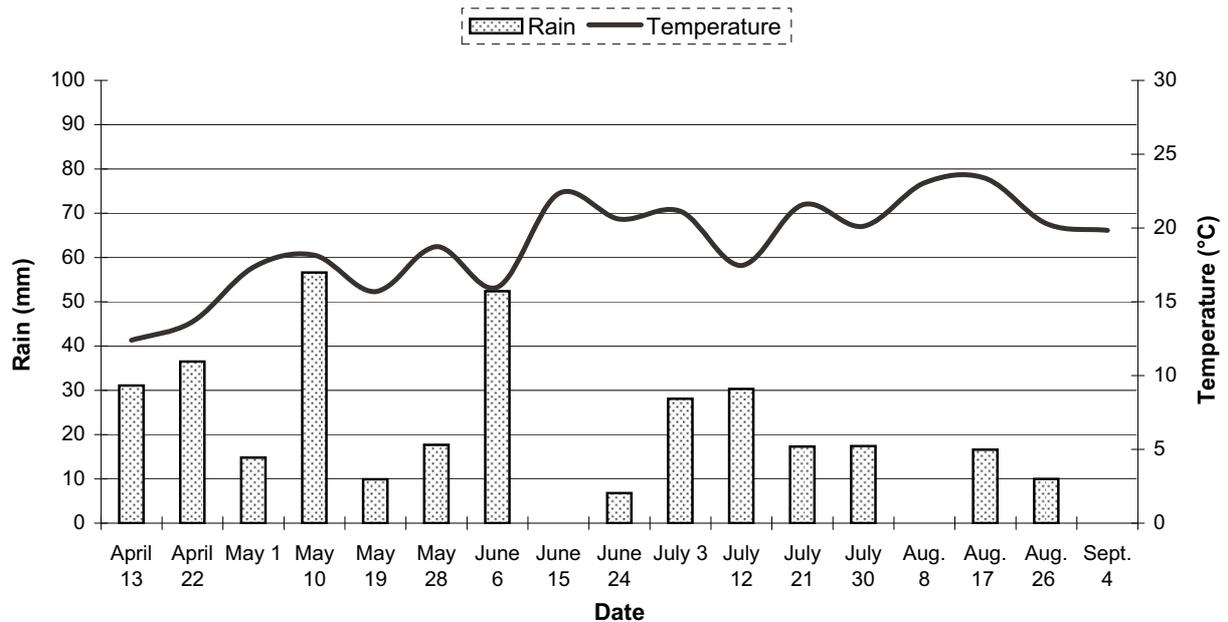


FIGURE D.2 – Year 2000

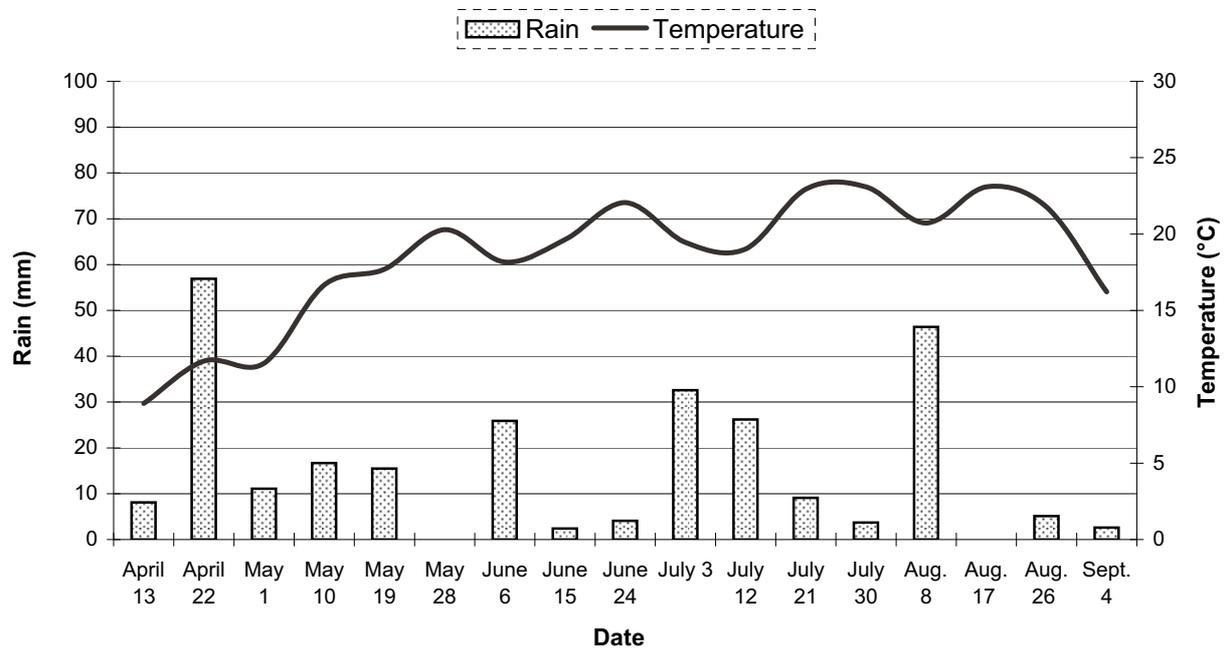


FIGURE D.3 – Year 2001

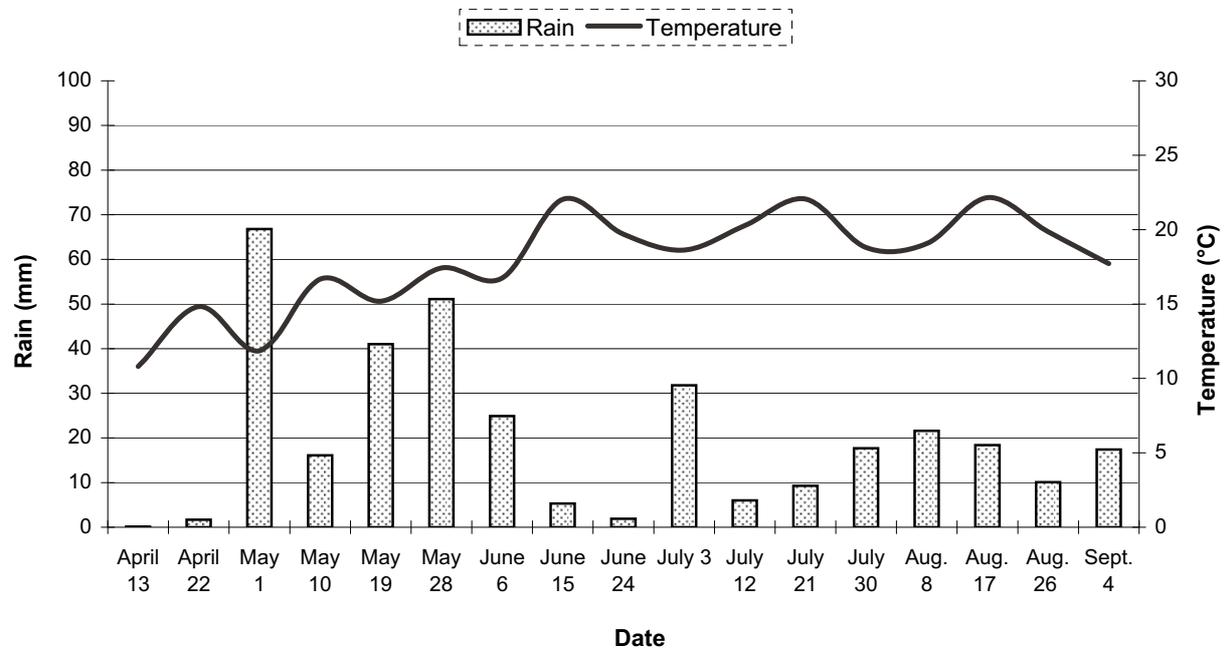


FIGURE D.4 – Year 2002

TABLE D.3.3 – Soils hydrodynamic functioning parameters

	Horizon depth (cm)	Field capacity (g.g ⁻¹)	Permanent wilting point (g.g ⁻¹)	Bulk density	Stone content (%)	Type of stone	Infiltrability (mm/day)
Sandy clay							
	0-24	33.00	20.00	1.35	0.00	limestone	50.00
	24-90	33.00	19.00	1.52	0.00	limestone	50.00
	90-146	38.00	25.00	1.51	0.00	limestone	50.00
Clay loam							
	0-29	22.00	10.00	1.46	0.00	limestone	50.00
	29-58	24.00	12.00	1.50	0.00	limestone	50.00
	58-70	27.00	15.00	1.51	0.00	limestone	50.00
Silty clay loam							
	0-32	21.00	8.00	1.47	0.00	limestone	50.00
	32-47	27.00	13.00	1.51	0.00	limestone	50.00
	47-60	30.00	16.00	1.51	0.00	limestone	50.00
Silt loam							
	0-26	18.00	8.00	1.53	0.00	limestone	50.00
	26-64	19.00	7.00	1.57	0.00	limestone	50.00
	64-98	20.00	8.00	1.51	0.00	limestone	50.00

D.3.3 Plant phenology

The plant developmental stage is based on the accumulation of thermal units (ATU), i.e. the sum of the daily thermal units calculated by averaging maximum and minimum temperature and subtracting a base temperature of 6 °C (Muchow et al., 1990). Simulating crop growth requires to state the following parameters⁴⁷ :

TABLE D.3.4 – Development stages (foliar index)

Development stage	ATU (degree-day)					
	Wheat	Hard wheat	Rape	Corn	Soybean	Sunflower
End of the juvenile phase	245 [†]	305 [†]	430 [†]	300 [†]	90 [†]	276 [†]
End of the net foliar index growth	620 [†]	710 [†]	850 [†]	900 [†]	620 [†]	870 [†]
Beginning of the senescence period	1295 [†]	1285 [†]	1150 [†]	1400 [†]	880 [†]	1070 [†]
Physiological maturity	1667 [†]	1952 [†]	2190 [†]	2220 [†]	1640 [†]	2336 [†]

[†]ATU from the vegetative budburst.

47. Note that other more technical parameters should be precised as well.

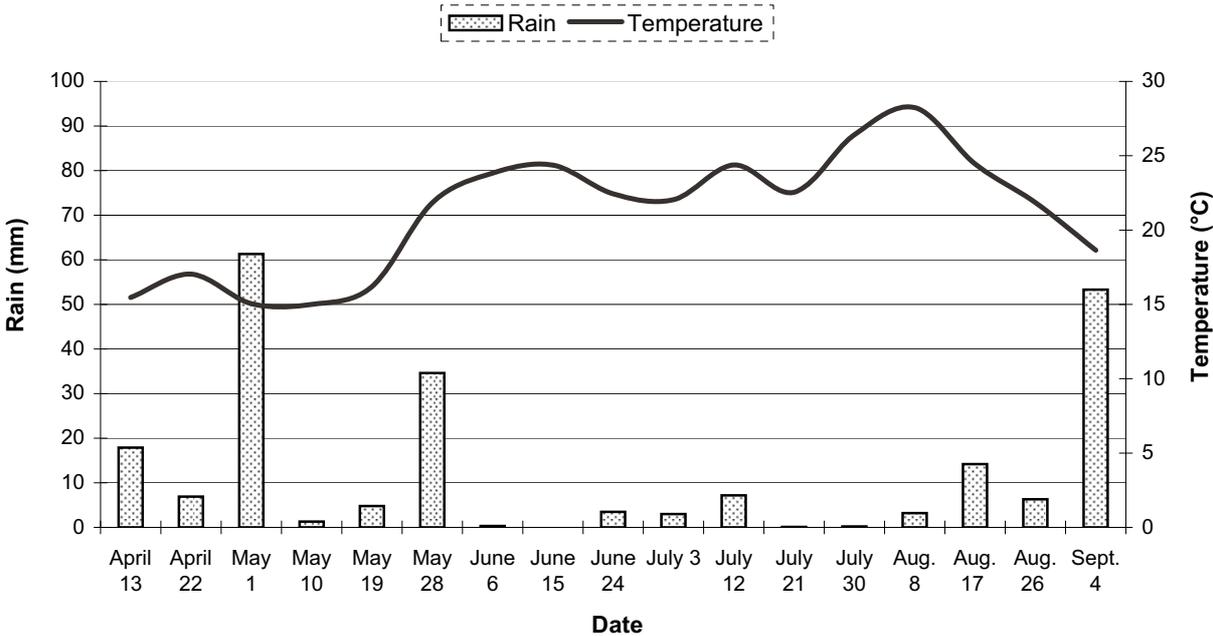


FIGURE D.5 – Year 2003

D.3.4 Cultural operations planning

Crop management parameters incorporated into the model are summarized in the following table :

TABLE D.3.5 – Crop management

Operation	Date	Depth (cm)	Other characteristics
Wheat[‡]			
Soil tillage	Nov. 5 th	15	Residues are characterized by a fresh matter quantity (8 tonnes/ha), a carbon proportion (43%) and a “Carbon/Nitrogen” ratio (60%).
Fertilization 1	Feb. 21 st	0	An application of 45 kg/ha ammonium nitrate fertilizer is made.
Fertilization 2	March 23 rd	0	An application of 75 kg/ha ammonium nitrate fertilizer is made.
Fertilization 3	April 27 st	0	An application of 45 kg/ha ammonium nitrate fertilizer is made.
Sowing	Nov. 6 th	2.5	Sowing density is put equal to 250 plants/m ² .
Harvesting	-	-	Harvest occurs endogenously. A cut-off date is set to December 1 st .
Hard wheat[‡]			
Soil tillage	Nov. 5 th	15	Residues are characterized by a fresh matter quantity (8 tonnes/ha), a carbon proportion (43%) and a “Carbon/Nitrogen” ratio (60%).
Fertilization 1	Feb. 21 st	0	An application of 45 kg/ha ammonium nitrate fertilizer is made.
Fertilization 2	March 23 rd	0	An application of 75 kg/ha ammonium nitrate fertilizer is made.
Fertilization 3	April 27 st	0	An application of 45 kg/ha ammonium nitrate fertilizer is made.
Sowing	Nov. 6 th	3	Sowing density is put equal to 250 plants/m ² .
Harvesting	-	-	Harvest occurs endogenously. A cut-off date is set to December 1 st .
Rape[‡]			
Soil tillage	Sept. 1 st	30	Residues are characterized by a fresh matter quantity (2 tonnes/ha), a carbon proportion (42%) and a “Carbon/Nitrogen” ratio (60%).
Fertilization 1	Feb. 10 st	0	An application of 60 kg/ha ammonium nitrate fertilizer is made.
Fertilization 2	March 15 st	0	An application of 60 kg/ha ammonium nitrate fertilizer is made.
Sowing	Sept. 2 nd	4	Sowing density is put equal to 50 plants/m ² .
Harvesting	-	-	Harvest occurs endogenously. A cut-off date is set to December 1 st .
Corn			
Soil tillage	April 22 nd	25	Residues are characterized by a fresh matter quantity (12 tonnes/ha), a carbon proportion (43%) and a “Carbon/Nitrogen” ratio (60%).
Fertilization	April 26 st	0	An application of 191 kg/ha ammonium nitrate fertilizer is made. Water irrigation also provides mineral nitrogen throughout the season.
Sowing	April 26 nd	5	Sowing density is put equal to 8 plants/m ² .
Harvesting	-	-	Harvest occurs endogenously. A cut-off date is set to October 27 th .
Soybean			
Soil tillage	April 25 st	25	Residues are characterized by a fresh matter quantity (0 tonne/ha), a carbon proportion (42%) and a “Carbon/Nitrogen” ratio (80%).
Fertilization	-	-	No nitrogen fertilization (soybean is a fabaceae).
Sowing	April 26 st	4	Sowing density is put equal to 40 plants/m ² .
Harvesting	-	-	Harvest occurs endogenously. A cut-off date is set to November 6 th .
Sunflower			
Soil tillage	April 19 st	25	Residues are characterized by a fresh matter quantity (9 tonnes/ha), a carbon proportion (42%) and a “Carbon/Nitrogen” ratio (90%).
Fertilization	April 26 st	0	An application of 62 kg/ha ammonium nitrate fertilizer is made.
Sowing	April 20 st	3	Sowing density is put equal to 6.22 plants/m ² .
Harvesting	-	-	Harvest occurs endogenously. A cut-off date is set to December 31 st .

[‡] These crops have been simulated on two consecutive climatic years.

D.4 Post-estimation of climate-contingent yield functions

Examples of estimation results

years = 2001, 2002, 2003

crops = wheat, corn

soil = hilly soils on smooth slopes

STICS calibration = detailed in appendix E.7.6

functional form = quadratic

irrigation for wheat : 6 possible dates (from May 1st to June 15th), 3 possible doses (0, 15, 30 mm) with a max of 180 mm

irrigation for corn : 9 possible dates (from June 15th to August 8th), 3 possible doses (0, 25, 50 mm) with a max of 450 mm

TABLE D.4.1 – Estimated climate contingent yield functions for selected years and crops (1)

	wheat (hilly soils on smooth slopes)		
	2001	2002	2003
<i>wat1</i>	1.593***	5.489***	9.752***
<i>wat2</i>	-1.237***	0.485**	3.018***
<i>wat3</i>	1.213***	-0.053	0.766*
<i>wat4</i>	-0.205	2.544***	24.708***
<i>wat5</i>	28.708***	2.124***	44.786***
<i>wat6</i>	12.376***	0.377**	1.227***
<i>wat7</i>	-0.515	18.631***	0.683*
<i>wat1_2</i>	-0.050***	-0.109***	-0.158***
<i>wat2_2</i>	-0.000	0.001	-0.058***
<i>wat3_2</i>	-0.052***	-0.007	-0.002
<i>wat4_2</i>	-0.023**	-0.064***	-0.459***
<i>wat5_2</i>	-0.670***	-0.055***	-0.904***
<i>wat6_2</i>	-0.379***	-0.003	-0.007
<i>wat7_2</i>	-0.011	-0.415***	-0.005
<i>wat1_wat2</i>	0.005	0.020***	-0.030***
<i>wat1_wat3</i>	0.008	0.009**	-0.009
<i>wat1_wat4</i>	0.009	0.001	-0.019***
<i>wat1_wat5</i>	0.000	-0.000	-0.018***
<i>wat1_wat6</i>	0.004	0.001	-0.005
<i>wat1_wat7</i>	-0.010	0.003	-0.005
<i>wat2_wat3</i>	-0.002	-0.006*	-0.008
<i>wat2_wat4</i>	0.024***	-0.031***	0.003
<i>wat2_wat5</i>	-0.004	-0.026***	0.001
<i>wat2_wat6</i>	-0.001	0.000	-0.028***
<i>wat2_wat7</i>	0.015***	-0.027***	-0.006
<i>wat3_wat4</i>	0.013***	-0.007**	-0.013**
<i>wat3_wat5</i>	-0.049***	-0.006*	-0.005
<i>wat3_wat6</i>	0.034***	-0.004	0.001
<i>wat3_wat7</i>	0.039***	-0.010***	-0.012*
<i>wat4_wat5</i>	-0.035***	0.025***	-0.237***
<i>wat4_wat6</i>	0.029***	-0.005	-0.012*
<i>wat4_wat7</i>	0.039***	0.020***	-0.000
<i>wat5_wat6</i>	0.205***	-0.001	-0.008
<i>wat5_wat7</i>	-0.034***	0.024***	-0.002
<i>wat6_wat7</i>	0.032***	-0.010***	-0.000
<i>_cons</i>	4993***	4857***	4768***

*significant at 10%, **significant at 5%, ***significant at 1%.

TABLE D.4.2 – Estimated climate contingent yield functions for selected years and crops (2)

	corn (hilly soils on smooth slopes)		
	2001	2002	2003
<i>wat1</i>	8,751***	18,493***	9,691***
<i>wat2</i>	17,681***	21,044***	12,666***
<i>wat3</i>	17,466***	17,935***	7,703***
<i>wat4</i>	19,582***	18,743***	10,207***
<i>wat5</i>	15,344***	16,442***	12,063***
<i>wat6</i>	18,593***	15,778***	7,039***
<i>wat7</i>	18,311***	15,002***	2,440*
<i>wat8</i>	17,021***	12,288***	9,560***
<i>wat9</i>	13,647***	9,718***	-2,682**
<i>wat1_2</i>	-0,037***	-0,281***	-0,073***
<i>wat2_2</i>	-0,067***	-0,166***	-0,016
<i>wat3_2</i>	-0,058***	-0,072***	0,031
<i>wat4_2</i>	-0,064***	-0,078***	-0,007
<i>wat5_2</i>	-0,041***	-0,061***	-0,001
<i>wat6_2</i>	-0,065***	-0,059***	-0,014
<i>wat7_2</i>	-0,055***	-0,053***	0,095***
<i>wat8_2</i>	-0,037***	-0,041***	-0,160***
<i>wat9_2</i>	-0,050***	-0,024**	0,028
<i>wat1_wat2</i>	-0,061***	-0,136***	0,027**
<i>wat1_wat3</i>	-0,039***	-0,064***	0,017
<i>wat1_wat4</i>	-0,043***	-0,059***	0,009
<i>wat1_wat5</i>	-0,038***	-0,036***	0,013
<i>wat1_wat6</i>	-0,011	-0,020***	0,000
<i>wat1_wat7</i>	-0,035***	-0,038***	0,004
<i>wat1_wat8</i>	-0,019**	-0,016**	0,032**
<i>wat1_wat9</i>	0,009	-0,008	-0,016
<i>wat2_wat3</i>	-0,089***	-0,107***	-0,009
<i>wat2_wat4</i>	-0,079***	-0,101***	-0,029**
<i>wat2_wat5</i>	-0,058***	-0,054***	-0,044***
<i>wat2_wat6</i>	-0,057***	-0,056***	0,002
<i>wat2_wat7</i>	-0,051***	-0,048***	0,031**
<i>wat2_wat8</i>	-0,049***	-0,039***	0,003
<i>wat2_wat9</i>	-0,036***	-0,033***	0,009
<i>wat3_wat4</i>	-0,091***	-0,128***	0,006
<i>wat3_wat5</i>	-0,062***	-0,071***	-0,02
<i>wat3_wat6</i>	-0,064***	-0,066***	0,005
<i>wat3_wat7</i>	-0,061***	-0,062***	0,028**
<i>wat3_wat8</i>	-0,056***	-0,039***	0,027**
<i>wat3_wat9</i>	-0,034***	-0,032***	0,000
<i>wat4_wat5</i>	-0,077***	-0,074***	-0,019
<i>wat4_wat6</i>	-0,074***	-0,067***	0,038***
<i>wat4_wat7</i>	-0,068***	-0,058***	0,012
<i>wat4_wat8</i>	-0,077***	-0,053***	0,030**
<i>wat4_wat9</i>	-0,044***	-0,037***	-0,001
<i>wat5_wat6</i>	-0,056***	-0,081***	-0,043***
<i>wat5_wat7</i>	-0,054***	-0,065***	0,036***
<i>wat5_wat8</i>	-0,052***	-0,048***	0,028**
<i>wat5_wat9</i>	-0,043***	-0,043***	0,033**
<i>wat6_wat7</i>	-0,084***	-0,068***	-0,005
<i>wat6_wat8</i>	-0,087***	-0,048***	0,058***
<i>wat6_wat9</i>	-0,057***	-0,039***	-0,002
<i>wat7_wat8</i>	-0,085***	-0,051***	0,033**
<i>wat7_wat9</i>	-0,069***	-0,038***	0,021
<i>wat8_wat9</i>	-0,074***	-0,049***	0,002
<i>_cons</i>	6446***	8502***	920***

*significant at 10%, **significant at 5%, ***significant at 1%.

D.5 Further results

D.5.1 Baseline case

TABLE D.5.1 – Average yields for each crop and each type of farmer

Type of farmer	Yield (in kg per ha)					
	wheat	hard wheat	rape	corn	soybean	sunflower
<i>vsf</i>	2616	-	-	4893	-	2287
C_{i-}^s	3610	-	2678	5245	-	2287
C_{i+}^s	3610	3226	-	9173	2658	2287
C_{i-}^a	3610	4551	2678	6699	1951	2287
C_{i+}^a	4761	3226	3844	8478	2658	2594
C_{i-}^l	3610	4551	2678	7449	2658	2287
C_{i+}^l	4761	3226	3844	8524	2658	-
M^s	3610	-	-	9173	-	2287
M^a	3610	-	-	8934	-	2287
M^l	3610	3226	3208	8613	1951	2287
<i>ofm</i>	3469	-	-	7900	-	1418

TABLE D.5.2 – Average yields for each crop and each year

Crops	Years			
	2000	2001	2002	2003
wheat	4595	4471	2485	3638
hard wheat	5064	4616	3723	2730
rape	3413	2340	3082	3020
corn	8359	9047	11144	4495
soybean	2706	2787	3641	767
sunflower	2824	2199	2880	1183

TABLE D.5.3 – Average yields for irrigated and non irrigated crops

Crops	Yields (in kg per ha)		
	all crops	non irrigated	irrigated
wheat	3797	3797	-
hard wheat	4033	4033	-
rape	2964	2964	-
corn	8261	4228	8526
soybean	2475	1951	2658
sunflower	2272	2272	-

TABLE D.5.4 – Regional land allocation

Crops	Regional land allocation (in ha)	
	non irrigated crops	irrigated crops
wheat	6591	-
hard wheat	793	-
rape	838	-
corn	218	3325
soybean	225	646
sunflower	3042	-

D.5.2 New allocation rules

TABLE D.5.5 – Impact of the allocation rule on the land allocation

Crops	Regional land allocation (ha)			
	quota based on agricultural land		quota based on irrigated land	
	non irrigated crops	irrigated crops	non irrigated crops	irrigated crops
wheat	7547 (+15%)		6165 (-6%)	
hard wheat	793		793	
	-		-	
rape	838		838	
	-		-	
corn	218	2486 (-25%)	218	2387 (-28%)
	-		-	
soybean	225	502 (-22%)	225	1748 (+171%)
	-		-	
sunflower	3042	28 (+28 ha)	3042	262 (+262 ha)
	-		-	

D.5.3 Impact of risk

Regional effects

TABLE D.5.6 – Impact of the allocation rule on the regional land allocation

Crops	REGIONAL LAND ALLOCATION					
	optimal water allocation		quota based on agricultural land		quota based on irrigated land	
	non irrig. crops	irrig. crops	non irrig. crops	irrig. crops	non irrig. crops	irrig. crops
wheat	6591		5734 (-13%)		5327 (-19%)	
hard wheat	793		1094 (+38%)		769 (-3%)	
rape	838		1774 (+112%)		741 (-11%)	
corn	185	3358	516 (+179%)	1741 (-48%)	541 (+192%)	2129 (-37%)
soybean	258	613	258	1072 (+75%)	258	1244 (+103%)
sunflower	3014	28	3490 (+16%)		4623 (+53%)	46 (+63%)

D.6 Water scenario

We consider that the average volume of water available moves from 4.2 million cubic meters to 3.6. The overall reduction of irrigated land represent -19.7% of the irrigated land in the baseline scenario. It is interesting to notice that the irrigation strategies are only slightly modified. The average intensity of irrigation are respectively 126.3 and 47.3 mm per ha respectively for corn and soybean. Compared to the baseline case, it corresponds to a reduction of water intensity by less than 1% for corn and by 1.4% for soybean. It is more profitable for the farmer to modify the land allocation across irrigated and non irrigated crops than to restrict water intensity on irrigated crops. In terms of economic results, the reduction in the available water induces a loss of profit representing on average -5.3% of the regional profit in the baseline case. The average profit goes down from 572 euros per ha on average to 542 euros par ha.

TABLE D.5.7 – Impact of the water allocation rule on the land allocation between irrigated and non-irrigated crops

Crops	INTRA-TYPE LAND ALLOCATION					
	optimal water allocation		quota based on agricultural land		quota based on irrigated land	
	non irrig. crops	irrig. crops	non irrig. crops	irrig. crops	non irrig. crops	irrig. crops
<i>vsf</i>	1.979	0.065	1.979	0.065	2.021	0.023
			-	-	(+2%)	(-65%)
C_{i-}^s	21.139	0.385	21.139	0.385	21.331	0.193
			-	-	(+1%)	(-50%)
C_{i+}^s	12.516	16.075	22.146	6.444	11.829	16.761
			(+77%)	(-60%)	(-5%)	(+4%)
C_{i-}^a	65.839	6.331	65.839	6.331	68.101	4.069
			-	-	(+3%)	(-36%)
C_{i+}^a	31.581	32.54	44.893	19.229	31.581	32.54
			(+42%)	(-41%)	-	-
C_{i-}^l	127.569	26.206	124.962	28.815	124.962	28.814
			(-2%)	(+10%)	(-2%)	(+10%)
C_{i+}^l	55.833	77.809	74.152	59.489	53.391	80.251
			(+33%)	(-24%)	(-4%)	(+3%)
M^s	9.866	1.728	9.787	1.807	10.909	0.685
			(-1%)	(+5%)	(+11%)	(-60%)
M^a	19.426	7.618	23.252	3.792	24.245	2.8
			(+20%)	(-50%)	(+25%)	(-63%)
M^l	67.605	29.467	82.424	14.648	78.265	18.806
			(+22%)	(-50%)	(+16%)	(-36%)
<i>ofm</i>	4.583	1.364	4.582	1.364	5.029	0.918
			-	-	(+10%)	(-33%)

TABLE D.6.1 – Regional land allocation (-20% of water resources)

crop	irrigated land (ha)	non irrigated land (ha)	change in irrigated land	change in non irrigated land
wheat		7259.165		12.1%
bread wheat		793.08		0.0%
rape		837.52		0.0%
corn	2705.187	168.3	-19.3%	0.0%
soybean	477.268	257.82	-22.1%	0.0%
sunflower		2944.15		0.0%

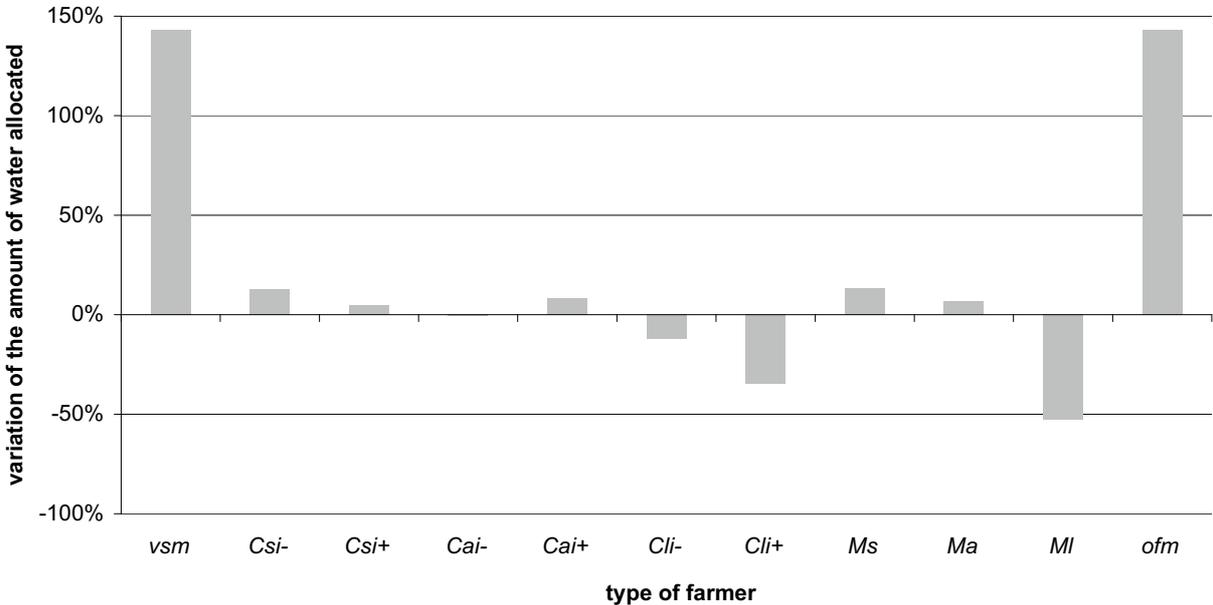


FIGURE D.6 – Variation of the optimal water quota with respect to the risk neutral case

Annexe E

Communication “How Irrigation Rationing Affect Water Value ?”

Abstract

The aim of this paper is to evaluate the impact of a temporary irrigation restriction on farmer’s water value. We develop an empirical model to take simultaneously into account farmer’s behavior and plant growth dynamics. A biophysical model is coupled with an economical model. The empirical application is based on a representative farm located in Southwest of France (Gers). We simulate various restrictions at different periods for a drought climatic scenario and show that two opposite effects can affect water value downward or upward. On one side, a “yield loss effect” leads to decrease the value of the resource; on an other side, a “drainage effect” increases it. Therefore, imposing a water limitation at a given period will not necessarily induce a reduction of the yearly water consumption.

E.1 Introduction

In southern Europe, within-year dry episodes occur increasingly and become recurrent in summertimes. Over the past decade, major drought events have taken place in central Europe and Mediterranean region. France and Portugal have been affected in 1997 [EEA, 2001]. A one year drought in Spain has caused huge damages in crop yields in 1999 [Guha-Sapir et al., 2004]. The 2000 drought in Central Europe has been viewed as the worst happened during the last 30 years in Cyprus, the worst in at least 50 years in Romania -26000 km² concerned- and the worst in 120 years in Bosnia and Herzegovina -about 60 % of agricultural production affected [EEA, 2004]. In May 2002, state of emergency has been declared in several Italian regions (Sicily, Basilicate, Puglia, Sardinia) because of water shortages [EEA, 2004]. The 2003 drought has been a significant illustration of Europe’s vulnerability and remains one of the most costly weather disaster in Europe (farm lobby groups estimated losses in agriculture of €11 billions [COPA-COGECA, 2003]). Exceptional rainfall deficits (groundwater levels reached 100 year record lows) have been combined with the warmest summer during the last 240 years (temperatures were 4-7 °C higher than average) [IES, 2005]. Most of countries have experienced water stress and increased water demands of irrigated agriculture have made drought circumstances worse [IES, 2005]. 2005 has been especially rough in Spain (driest year ever recorded by the National Meteorological Institute since 1947), Portugal (lost of 60% of the wheat production, corn yield fell

to 80%) and France (harvest of corn has been reported to 20% less than in 2004) [WWF, 2006]. In 2006, drought has affected the major part of Spain and Portugal and large parts of Italy and France [WWF, 2006].

The aim of this paper is to evaluate the impact of a temporary irrigation restriction on the annual water value. Indeed, in many areas, agriculture is the dominant water user and is viewed as the main cause of water shortages when a drought occurs. Policy makers can use a wide range of decentralized instruments (including tariffs) to manage the scarcity of the resource. But pricing mechanism need to be set correctly to be effective and existing systems are unable to set flexible prices in time. In crisis situation, when all demands can not be satisfied, drinking water get priority allocations : in Spain, the Water Act (1995) establishes a list of water uses ranked by order of importance (water supply in urban areas first, followed by irrigation and industrial uses for power generation) [Costejà et al., 2002]; in Italy, the Galli Act (1994) prescribes actions to provide water for human use in priority [Smets, 2006]; in France, the Water Act (1992), also gives priority to drinking water supply [JO, 1992]. Public authorities must comply with these legal recommendations implementing emergency measures : in most of cases, command and control approaches are adopted, taking form of provisory constraints imposed on agricultural water use. Despite it is a widely used instrument, only a few articles have focused on assessing the economic impacts of suspending irrigation. Hamilton et al (1989) study the value of water in two alternative uses (irrigation and hydropower) estimating income losses due to restricted water supplies. Results indicate that a water market would allow efficient water transfers from agriculture to hydropower generation because the marginal value of resource in the first use is lower than in the second [Hamilton et al., 1987]. In the same vein, Michelsen and Young (1993) estimate option values for provisional use of irrigation water and suggest option contracts could provide urban water supplies in dry years at a lower cost than water right purchases [Michelsen and Young, 1993]. Keplinger et al (1998) show that farmers’ willingness to participate to a suspension irrigation program depends on the moment at which it is announced : before the crop year (land use and crop choice may still be adapted), they are inclined to participate when a \$90 per acre compensation is given ; during the crop year, the authors predict that higher payments are necessary [Keplinger et al., 1998]. Several articles consider the value of irrigation water at different periods in time. Yaron and Dinar (1982) develop linear programming and dynamic programming models to optimize water allocation to alternative crops and plots : they determine the profit maximizing irrigation schedules in response to the shadow prices of water [Yaron and Dinar, 1982]. Taking into account the risk parameter, Beare et al. (1998) evaluate optimal seasonal water prices in various informational contexts and found that farmer’s valuation of water may be four times higher in an uncertain environment compared with a deterministic one [Beare et al., 1998]. Faux and Perry (1999) assess the value of irrigation from an hedonic price analysis applied to land sales [Faux and Perry, 1999].

We propose in this paper an original approach to evaluate the impact of an irrigation rationing measure on water value and water demand function. The method consists in coupling a crop growth simulation model with an economical, non linear optimization model. We simulate crop yields for a large number of irrigation schedules (407,312) and then apply an optimization process on the irrigation schedule/yield relationship. The objective of the procedure is to make use of the dynamic optimization model duality to assess the shadow price and the opportunity cost of water. This is a non trivial problem since institutional constraints (water quotas, irrigation prohibitions) and biophysical processes (plant growth, soil dynamics) must be simultaneously taken into account. We show empirically that the impact of a restriction on water value is variable (it may be positive or negative) depending on its amplitude and the date at which it is implemented. Two opposite effects are identified : a “yield loss” effect and a “drainage” effect. Our model is able to quantify which is the prevailing one.

The paper is organized as follows. Section 2 describes the model. In section 3, we derive sufficient conditions for demand function identifiability to be guaranteed. Section 4 is devoted to an empirical application on an irrigated corn crop cultivated in Southwest of France. Results are presented in section 5. Section 6 concludes.

E.2 The model

E.2.1 A dynamic problem

Optimal agricultural water allocation is a typical dynamic problem. At each time, shadow values of the constraints are affected by the irrigation dose chosen by the farmer. Biophysical processes and water management policies may result in complex dynamic economic interactions impacting on farmer's behavior.

Biological processes

Plant growth is not only determined by the total amount of water applied to the crop but also by the irrigation timing. The season is not constituted by a sequence of independent static periods because biological processes (plant growth) entail a strong interdependence between each other. Therefore, the irrigation schedule chosen by the farmer results from a non-Markovian decision process. The optimal water dose to apply at a t period depends on all the past climatic events of the season and water applications made up to this date : irrigation profitability is contingent on actual agronomic characteristics of the plant resulting from its "biological history" (especially past water stresses). Notice that the opportunity to apply a given water dose at period t also depends on weather forecasting and schedule planned for the next periods.

Physical processes

When irrigation flow is restricted by the equipment (sprinkler pipe size for example ⁴⁸), the farmer may have interest to take precautionary measures anticipating future water stresses. Most of the time, he implements early irrigations to hedge against the risk of water deficit as soil cannot be replenish quickly enough. In that case, it is actually appropriate to irrigate and fill up the reservoir, albeit the "instantaneous" resource value is equal to zero -since plant growth is not limited by any water stress at this time-, rather than save water for the next periods. On the other hand, if irrigation starts too early or is too large, there is a risk of drainage because of limited field capacity. It is a common sense notion that soil dynamics plays a determinant role in the farmer's decision making process. Hence, physical processes of the soil (water transfer mechanism from a layer to another) should be taken into account in an empirical framework.

Irrigation rationing implications

Institutional constraints like provisory irrigation restrictions may lead the farmer either to intensify or to reduce the irrigation activity. On one side, non-restricted periods may be used to counterbalance the restricted ones : crop cultivation profitability is partially preserved increasing water application before and after the regulation. On the other side, non satisfied crop water requirements (due to the restriction) have an impact on plant physiological activity and decrease the value of water. Indeed, water stress consequences are irreversible and crop yields would be in any case -that is, whatever the irrigation schedule implemented- lower than in a without restriction scenario. For example, if irrigation returns are lower than their costs because of restriction impacts, it is optimal not to irrigate (thus, water value is equal to zero).

48. In the empirical application, the maximal water dose that could be implemented at each period is 60 mm.

Existence of these processes involves that no “a-priori” form of production function of the plant may be settled. Hence, specifying an ad-hoc, hypothesis-based technological frontier would be inappropriate. The empirical application developed in section E.4 consists in generating technical processes (irrigation schedules/crop yields couples) describing the “biophysical production function”, that is the technology.

E.2.2 Farmer’s strategies

We are intended in identifying the best water allocation in time from the farmer’s viewpoint. Afterwards, this work will consist in choosing optimal strategies in the set of all possibles strategies. A *strategy* might be an *irrigation strategy* or a *fallow strategy*. We define these concepts in the following definitions :

Definition 4 An *irrigation strategy* is a vector of water doses applied to the field at each period of the season. Let $j \in \{1, \dots, J\}$ be the irrigation strategy $(\omega_{j1}, \dots, \omega_{jt}, \dots, \omega_{jT})$ corresponding to the T doses ω_{jt} applied at periods $t \in \{1, \dots, T\}$. The set of the J possible irrigation strategies is represented by the matrix $\Omega(J \times T)$ ⁴⁹.

Each dose $\omega_{jt} \in \mathcal{D} = \{d_1, \dots, d_n, \dots, d_N\}$, the finite set of implementable doses, with $d_n < \infty$. Hence, $J \leq N^T$. By convention, $d_1 = 0$. The total water quantity applied through the T periods is $q_j = \sum_{t=1}^T \omega_{jt}$. By convention, the first irrigation strategy ($j = 1$) corresponds to the strategy for which $q_1 = 0$ (ie, $\Omega_{1t} \equiv d_1, \forall t \in \{1, \dots, T\}$). At each strategy j is associated a crop yield y_j . We note $Y(J \times 1)$ the output vector. Notice that a “dry” culture is possible since $1 \in \Omega$.

Definition 5 A *fallow strategy* consists in letting the land unused during the growing season. This strategy is indexed by $j = J + 1$.

Definition 6 The set of *strategies* includes the irrigation strategies and the fallow strategy. The strategies are indexed by $j \in \{1, \dots, J, J + 1\}$.

Two space of strategies will be distinguished in section E.3 (discrete and continuous distribution space).

E.2.3 Farmer’s behavior

We describe the optimization behavior of the farmer. We denote by γ_j , with $\gamma_j \geq 0$ and $\sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j = 1$ the share of the agricultural area where the strategy j is implemented. Note that $\gamma_{J+1} > 0$ would mean that at least a part of the land lies fallow. The objective function of the farmer is to maximize its profit written as follows :

$$\Pi = \sum_{j=1}^J \gamma_j \cdot [py_j - \psi_j - \rho q_j - K^F] - \gamma_{J+1} K^F \quad (\text{E.2.1})$$

where p is the unit price of to the crop (in euros/kg), y_j the yield production associated to the j^{th} strategy (in kg/ha), ψ_j the unit cost of production without considering water expenses (in euros/ha), ρ the unit cost of water delivery (in euros/mm/ha), q_j the quantity of water applied by the j^{th} strategy (in mm/ha) and K^F the fixed cost of land ownership (in euros/ha). In equation (E.2.1), the term into brackets represents the net profit per hectare given by the strategy j .

49. the term Ω_{jt} gives the water dose at period t for the j^{th} strategy.

Public authorities conduct a quantitative management of the resource. First, the farmer has to subscribe an annual water quota $\bar{Q} \in \{Q_1, \dots, Q_k, \dots, Q_K\}$, defined in millimeters per hectare; thus, he faces a water availability constraint since the total water consumption per hectare must be lower than this threshold : $\sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j q_j \leq \bar{Q}$ ⁵⁰. Second, the manager may decide to prohibit irrigation water use at certain periods in order to guarantee drinking water supply or protect the environment. We suppose this policy feasible in the sense that amounts of resource at the non constrained periods are sufficient (the farmer re-optimize the allocation of the quota). The amount of water applied to the crop during a restriction is equal to zero such that a restriction implemented on the time interval $[\underline{t}, \bar{t}]$ writes : $\sum_{j=1}^{J+1} \sum_{t=\underline{t}}^{\bar{t}} \omega_{jt} = 0$ (remember that ω_{jt} is the water dose applied by the strategy j at period t).

The farmer's optimization program (P) writes :

$$\begin{aligned} & \max_{\{\gamma_1, \dots, \gamma_J, \gamma_{J+1}\}} \left(\sum_{j=1}^J \gamma_j [py_j - \psi_j - \rho q_j - K^F] - \gamma_{J+1} K^F \right) \\ & \text{s.t.} \quad \begin{cases} \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j q_j \leq \bar{Q} & (a) \\ \sum_{j=1}^{J+1} \sum_{t=\underline{t}}^{\bar{t}} \omega_{jt} = 0 & (b) \\ \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j = 1 & (c) \\ \gamma_j \geq 0 & (d) \end{cases} \end{aligned}$$

We note λ the shadow price associated with the constraint (a) and ϖ the shadow price associated at the constraint (b). λ is the marginal value of the subscribed quota \bar{Q} , that is the farmer's willingness to pay for this amount of water. ϖ is the marginal value of water flow during the restriction; it can be interpreted as the farmer's willingness to pay for a unit of water available at the restricted periods (a time series of ϖ for a given quota provide the "spot value" of the resource availability along the saison).

For simplicity, we assume water resource can be transferred from a place to another at no cost (free disposal hypothesis). The agricultural area is divided in fallow, non irrigated and irrigated crop fields without any constraint imposed by the equipment (for example, the equipment may be moved at no cost). The analysis is conducted in a deterministic framework (we want to know the minimal loss implied by the measure). Therefore, the farmer is aware of the climatic scenario and the restrictions he faces.

E.3 Demand function identifiability

As previously mentioned, no ad hoc crop growth function has been specified. This implies that the production function may or may not be concave. Therefore, the farmer's profit function is not guaranteed to be quasi-concave. Local non convexity may appear and make difficult the demand function identification. Indeed, following Hotelling's lemma, a demand function can be derived only from a quasi-concave profit function. We want to build a convex set of feasible profits as a relevant framework for economic analysis. Subsection E.3.1 gives two definitions. Subsection E.3.2 shows that we must consider the possibility to implement a combination of strategies applied to the plot rather than an exclusive one.

50. We assume for simplicity \bar{Q} large enough so that $\exists d_n \in D$ with $d_n \leq \bar{Q}$.

E.3.1 Two space of strategies

Definition 7 Strategies are distributed in a **discrete distribution space** if the control variable of the farmer γ is discrete such that $\gamma \in \Gamma_d = \left\{ (\gamma_j)_{j=1}^{J+1} \mid \sum_j \gamma_j = 1, \gamma_j \in \{0, 1\} \right\}$. The farmer allocates the whole agricultural area either to fallow, non irrigated crop or irrigated crop implementing an unique strategy.

Definition 8 Strategies are distributed in a **continuous distribution space** if the control variable of the farmer γ is continuous such that $\gamma \in \Gamma_c = \left\{ (\gamma_j)_{j=1}^{J+1} \mid \sum_j \gamma_j = 1, \gamma_j \in [0, 1] \right\}$. The farmer divide the agricultural area among fallow, non irrigated crop and irrigated crop implementing different strategies.

E.3.2 Building a convex set

Lemme 2 At the optimum in a continuous distribution space, the farmer, for a given level of quota, combines strategies which are optimal for different levels of quota in a discrete distribution space.

Proof of lemma 1 See appendix E.7.1.

Let Q_k be a quota in the set of the K quota levels that could be subscribed. Let $\pi_k^* = \pi_d^*(Q_k)$ be the maximum feasible profit in a discrete distribution space for a quota level Q_k . Let $q_k^* = q_d^*(Q_k)$ the water quantity applied by the strategy $j_d^*(Q_k)$ generating the profit π_k^* . Lemma 3 is a direct consequence of lemma 2.

Lemme 3 In a continuous distribution space, (P) consist in maximizing the function $\sum_{k=1}^K \alpha_k \pi_k^*$ subject to the constraints $\sum_{k=1}^K \alpha_k q_k^* \leq \bar{Q}$, $\sum_{k=1}^K \alpha_k = 1$ and $\alpha_k \geq 0$ with $\alpha_k \in [0, 1]$, the agricultural area fraction where the strategy $j_d^*(Q_k)$ is applied.

Proposition 3 In a continuous distribution space, the farmer’s profit function is quasi-concave.

Proof of proposition 1 See appendix E.7.2.

A graphical representation of proposition 3 can be found in appendix E.7.2.

Proposition 3 states that the profit function is a “well-behaved” function in a continuous space of strategies. However, note that this result comes from the free disposal hypothesis. The profit function is smoothed thanks to linear, convex combinations of optimal discrete strategies. Free disposal of factors (water and land) guarantees that the upper envelop of the original frontier is feasible.

E.4 Empirical application

E.4.1 The Baïses river basin

The procedure for water value identification and demand function determination has been applied using data from the Baïses river basin, in Gers (Southwest of France). This area is characterized by an oceanic climate but with a strong Mediterranean influence during the summer. Agriculture is the dominant activity of the region. Farmers mainly cultivate corn, a high water demanding crop (70% of the cultivated fields are irrigated). Hence, agriculture is the largest water consumer (2/3 of the total) and conflicts frequently occur with other users -municipal

and industrial- when water shortage happens [Bertin et al., 2005]. “Soft” agricultural water use regulations are difficult to implement because withdrawal (from stream or groundwater) are unobservable and costly to meter. In case of critical scarcity of the resource, authorities give a preferable treatment to drinking water and take legal measures prohibiting irrigation.

Past droughts in the area

Droughts were exceptional events until the 1990’s but are nowadays recurrent in the area and occur increasingly since the beginning of the 2000’s. Local streams were those which most suffered in France from the 2003 summer heat wave [Bertin et al., 2005]. During the month of August, runoffs reached their critical levels and even the restrictive measures for consumers did not perform to limit the impacts on river flows. From September 2004 to September 2005, pluviometry fell to a 1/3 of the average rainfalls in the last 50 years and the corn harvest in 2005 was 20 percent down on 2004 [Amigues et al., 2006]. In January 2006, water table was so low in all part of the country (50 percent drop in 2005 autumn rainfall) that the environment minister Nelly Olin told in a conference that France could face a record drought in 2006; Olin’s warning was particularly aimed at farmers who were in the process of deciding which spring crops to plant. The expected climatic disaster did not occur but 2006 still remained a difficult year.

E.4.2 Coupling biophysical and economic models

E.4.2.1 Using Stics to assess the impact of irrigation schedules on production

We use the crop growth simulation model Stics⁵¹ (see Brisson et al, 2003 [Brisson et al., 2003]) to characterize the relationship between irrigation and associated agricultural output. Agricultural economists usually estimate production functions thanks to econometric methods, that is statistical estimation of the input-output relationship. But the main drawback of this approach is that it is difficult to take into account the intra-seasonal water allocation timing, which has a decisive impact on final output. Data used are usually aggregate input and output quantities giving an annual water application/yield relationship. On the contrary, the irrigation timing is taken into account by Stics : it is a daily time-step crop model calculating daily growth rate in relation to the quantity of water applied. It also considers the interactions between crop growth with climate, soil and tillage practices. Hence, using an agronomic simulator is a relevant way to operate water irrigation research.

A two step procedure is used to simulate all possible farmer’s irrigation strategies. First, we build a Gams program generating the matrix $\Omega(J \times T)$. The matrix represents the set of all possible irrigation strategies. It is settled through counting for a given number of periods and a finite number of water doses (in mm). Second, the irrigation strategies gathered in $\Omega(\cdot)$ are input data to Stics : each one can be simulated and associated to a crop yield thanks to the C-version of the model (see Poupa, 2006 [Poupa, 2006]). Therefore, there is an input-output correspondence between the strategies matrix $\Omega(J \times T)$ and the output vector $Y(J)$.

E.4.2.2 Solving the economical model by an optimization process

The farmer’s behavior has been coded using the algebraic modeling language Gams [Rosenthal, 2008]. Gams is a comprehensive computer algorithm for solving large and complex mathematical programming models. We used non linear programming. According to results of section E.3, the procedure has been realized for a continuous distribution space of strategies (basically, the control variable of the problem is continuous).

51. Simulateur mulTIidisciplinaire pour les Cultures Standards.

The optimization process consist in calculating the profit maximizing combination of irrigation strategies : the program identifies the distribution of strategies which is technologically efficient and economically optimal. The model integrates both the input-output correspondence -that is the matrix $\Omega(J \times T)$ and the vector $Y(J)$ - and economical data such as prices, costs or institutional constraints (quota, irrigation prohibition). Therefore, farmer’s decisions are parameterized by climate, soil, price of the crop, cost of production, cost of water, restrictions and quota level. We determinate the opportunity cost of the quota, which is the marginal shadow price of the resource. Then, simulating for diverse quota constraints, we can generate the implicit water demand function.

E.4.3 Data

E.4.3.1 Calibration of the biophysical model

Stics should be parameterized by soil, climate and cultural operations planning data to run simulations. Input files also include the irrigation strategies matrix.

Soil characteristics We stated soil profiles thanks to a soil map the Midi-Pyrénées chamber of agriculture has carried out⁵². The material provides information on granulometry (percent of sand, silt and clay found in soil samples), natural nutrient status (supplies of phosphorous, potassium, calcium and magnesium) and others fertility indicators as pH for each layer or horizon depth. Using this parameters set, the model was calibrated with the view to be closed to the soil environment. A more formal presentation of the soil characteristics used for calibrating STICS can be found in the Appendix E.7.6.

Climate characteristics Weather variability was taken into account by the biophysical simulator integrating climate data, that is data on air temperature, solar radiation, rainfall and potential evapotranspiration (PET). Exhaustive climatic years⁵³ have been provided by the Inra Department of Agronomy. We regarded the climatic years 1976 (“dry” scenario) as a possible weather scenarios. A more formal presentation of the climate data used for calibrating STICS can be found in the Appendix E.7.6.

Crop and cultural operations planning The simulated crop is corn since it is the more water demanding crop in the area. We stated cultural operations at the field level according to usual farmer’s practices of tillage and soil preparation, fertilizer application and sowing. Agronomists observe standard farming activities throughout the season and define “schedules” summarizing the whole land farm process. Crop management includes in particular soil tillage with ploughing-in of residues (date, depth, quantity), sowing (date, depth, density, variety), mineral fertilization (date, depth, quantity, type of fertilizer) and harvesting (criteria used to define the suitable time). Notice that sowing date must be given as a parameter but harvesting date is an endogenous variable : crop maturity is defined by a maximal threshold for grain water content and is determined by the model⁵⁴. The interested reader may refer to Appendix E.7.6 for a more formal presentation

52. Various pedologic studies have enabled the chamber of agriculture to identify 66 standard soils for the whole region. They are sorted by “large units” and “subunits” of geographic areas on <http://www.midipyrenees.chambagri.fr/-Carte-des-sols-.html>.

53. A 12-month period used in the collection of daily weather parameters. Climatic years begin January 1 and end December 31, and are designated by the calendar year.

54. When water content does not reach the reference threshold, the harvesting date is set to a cut-off date. This one is designed to take into account socioeconomic factors but has nothing to do with the physiological stage of the crop.

of the Cultural operations planning data used for calibrating STICS.

Irrigation strategies The irrigation season (from May 20 to September 10) was divided into 15 identical periods ($T=15$), that is the number of potential dates for a water application in a strategy. Water application depth might be 0, 25 or 50 mm at each period. As we said before, the sowing date was exogenous (fixed in the 116th day of the calendar year) and the crop was harvested at the endogenous maturity date. We have limited the number of water applications during the irrigation campaign to 6 (the observed number of water applications varies from 3 to 6 for the region considered) and the total amount of water to 300 mm. It follows that the number of irrigation strategies that must be evaluated by STICS is 407,312.

E.4.3.2 Calibration of the economical model

The economic model was calibrated on current prices and constraints.

Prices and charges According to equation (E.2.1), there are three parameters that need to be specified to describe the net agricultural profit : the unit output price p (in euro per kg), the unit cost of production excluding the water expenses ψ_j (in euros per ha) and the unit cost of water delivery ρ (in euros per mm per ha). K^F is a fixed cost. All these data were collected from public reports. A first reference is the CGGREF report for the Ministry of Agriculture, "Irrigation durable" [Bertin et al., 2005]. It gives some informations on agricultural water costs. Second, surveys made by the Ministry of Agriculture Statistical Department (Agreste⁵⁵) in 2000 reported farmers' practices, quantities of inputs used and gave socioeconomic indicators.

Prices Corn price is fixed to $p = 0,111\text{-}\text{€}/\text{kg}$. Water price ρ includes fees for the service ($0,04\text{-}\text{€}/\text{m}^3$, that is $0,4\text{-}\text{€}/\text{mm}$) and the river bassin agency tax ($0,005\text{-}\text{€}/\text{m}^3$, that is $0,05\text{-}\text{€}/\text{mm}$).

Charges Costs of production ψ_j include tillage, sowing and harvesting activities and overall amount of inputs (seed, fertilizers, plant health nutrients) used throughout the season on one unit of land ; we parameterized $\psi_j = 461\text{-}\text{€}/\text{ha}$. The fixed costs K^F include rental charges ($115\text{-}\text{€}/\text{ha}$) and others services ($248\text{-}\text{€}/\text{ha}$).

Water quota The farmer is allocated by the manager an annual water quota \bar{Q} corresponding to an annual volume of water available for irrigation (water volume defined in mm per ha). Hence the total annual water consumption per ha must be lower than this threshold. We made the optimization process for different quota levels (from 0 to 300 mm).

Restrictions We simulated the restrictions detailed in the following table :

E.5 Results

E.5.1 Impact of irrigation prohibitions on annual water value

An intuitive result would be that an irrigation rationing measure inevitably decreases water value : it seems consistent that a resource that can not be used at certain periods of time is less

55. Statistics and studies on agriculture, forestry, agri-food industry, land use, facilities and environment in rural areas.

TABLE E.4.1 – The simulated restrictions

Prohibited time interval		restricted periods		Prohibited time interval		restricted periods	
.	-	May 05	1 & 2	July 10	-	July 26	8 & 9
May 23	-	June 08	2 & 3	July 18	-	August 03	9 & 10
May 31	-	June 16	3 & 4	July 26	-	August 11	10 & 11
June 08	-	June 24	4 & 5	Aug. 03	-	August 19	11 & 12
June 16	-	July 02	5 & 6	Aug. 11	-	August 27	12 & 13
June 24	-	July 10	6 & 7	Aug. 19	-	Sept. 04	13 & 14
July 02	-	July 18	7 & 8	Aug. 27	-	.	14 & 15

attractive than a non constrained one. But water cannot be regarded as a conventional good. We show empirically that the impact of a restriction is not straightforward and requires to develop a bioeconomic approach to be correctly predicted.

For simplicity, we only consider two well-chosen restrictions : from June 24 to July 10 and from August 03 to August 19 (table E.5.1). The interested reader may refer to Appendix E.7.5 for additional results.

TABLE E.5.1 – Quota and flow value depending on resource availability in time

Prohibited period (date)	$\bar{Q} = 100$			$\bar{Q} = 200$			$\bar{Q} = 300$		
	Π (€/ha)	λ (€/mm)	ϖ (€/mm)	Π (€/ha)	λ (€/mm)	ϖ (€/mm)	Π (€/ha)	λ (€/mm)	ϖ (€/mm)
From June 24 to July 10	-82,72 (-7,28%)*	2,80 (-2,10%)**	0,085	184,23 (-5,99%)*	2,14 (-3,60%)**	0,11	296,15 (-6,97%)*	0 (=)**	0,47
From Aug. 03 to August 19	-93,09 (-20,72%)*	2,70 (-5,59%)**	0,48	176,83 (-9,76%)*	2,70 (21,62%)**	0,48	314,02 (-1,36%)*	0 (=)**	0,12
Baseline case (no restriction)	-77,11 (=)*	2,86 (=)**	-	195,96 (=)*	2,22 (=)**	-	318,35 (=)*	0 (=)**	-

* Figures between brackets are profit variations beside the non restricted baseline case. The sign “=” indicate that the restriction implementation has no impact on the profit.

** Figures between brackets are variations of marginal value of quota beside the non restricted baseline case. The sign “=” indicates that the restriction implementation has no impact on the value of λ . These variations are equal to $+\infty$ when $\lambda = 0$ in the non restricted case.

Consider the profit and marginal quota value variations beside the non restricted baseline case. First, we found some expected results such as profit are logically decreased by the restriction. Notice that amplitudes of reductions are not contingent on quota levels. For example, an irrigation prohibition implemented from June 24 to July 10 decreases profit by 7,2% if $\bar{Q} = 100$, 5,99% if $\bar{Q} = 200$ and 6,97% if $\bar{Q} = 300$. Thus, rationing effects for a given level of quota may be either greater or lower than for a higher quota level. Second, we found non-obvious results about the variations of λ related to the restriction. We observe that its value in the restricted case may be equal, higher or lower than in the non restricted one : for $\bar{Q} = 100$, λ is lowered whatever the dates at which the interdiction is implemented ; for $\bar{Q} = 300$, the value of λ always remains unchanged ; for $\bar{Q} = 200$, λ is decreased (-3,60%) if the irrigation activity is restricted from June 24 to July 10 but is increased (+21,62%) when the restriction takes place from August

03 to August 19 (additional examples are available in appendix E.7.5). These figures illustrate the economical implications of the complex biophysical processes discussed in subsection E.2.1. Indeed, farmer's water valuation depends on two opposed effects : the "yield loss effect" and the "drainage effect".

Two opposed effects

Yield loss effect

The scarcity of the resource may entail a decrease in its value. The irreversibility of impacts of water stress on plant growth cause irrecoverable damages that no additional irrigation is able to mitigate. In that case, even higher irrigation levels implemented in the non restricted periods would not get a strong harvest. The "hope value" of the water (ie. its profitability) is thus reduced and λ **decreases**. This fact leads the farmer to curtail his agricultural water demand (or even cease all irrigation activity if crop growth is definitely stopped).

Drainage effect

A temporary proscription of the irrigation activity lead the farmer to irrigate the other periods excessively. He is constrained to advance or postpone -at least partially- water applications that would have been done in a non restricted case. Hence, the water doses applied in the non-restricted periods are larger than those which would have been applied at the same periods in a without-restriction framework. The new irrigation schedule entails a waste of resource compared with the non-restricted one because the total amount of water available for the growing season is not allocated following the optimal timing. The opportunity value of the resource is reduced because drainage phenomenon appears (water percolate through the soil and can not be recovered for the crop). As a result of that, the opportunity cost of using the resource at a relevant period is higher and λ **increases**. Indeed, it is consistent that a "without regret" allocation should be implemented such that it is more costly (compared to the non-restricted case) to forsake this irrigation schedule for another.

Coexistence of these two opposed effects make understandable results of table E.5.1. For $\bar{Q} = 100$, the yield loss effect is always superior to the drainage effect : λ is reduced compared to its value in the non-restricted case. For $\bar{Q} = 300$, none of the two is dominant. Notice that quota values are not modified despite the fact that profits are decreased. For $\bar{Q} = 200$, the yield loss effect prevails (λ decreases) when irrigation is prohibited from June 24 to July 10 whereas the drainage effect is dominant (λ increases) if the restriction is implemented from August 03 to August 19.

E.5.2 Impact of irrigation prohibitions on agricultural water demand function

Water demand functions have been identified simulating the marginal shadow price of the resource for diverse quota constraints. We compare the demand functions associated with the two restrictions analyzed in subsection E.5.1 with the demand function associated with the baseline case (no restriction).

Prohibiting irrigation from June 24 to July 10 leads the farmer to shift his demand function downward. Yearly water consumption is reduced whatever the unit price of the resource. This situation corresponds to the intuitive, expected consequences of an irrigation rationing measure.

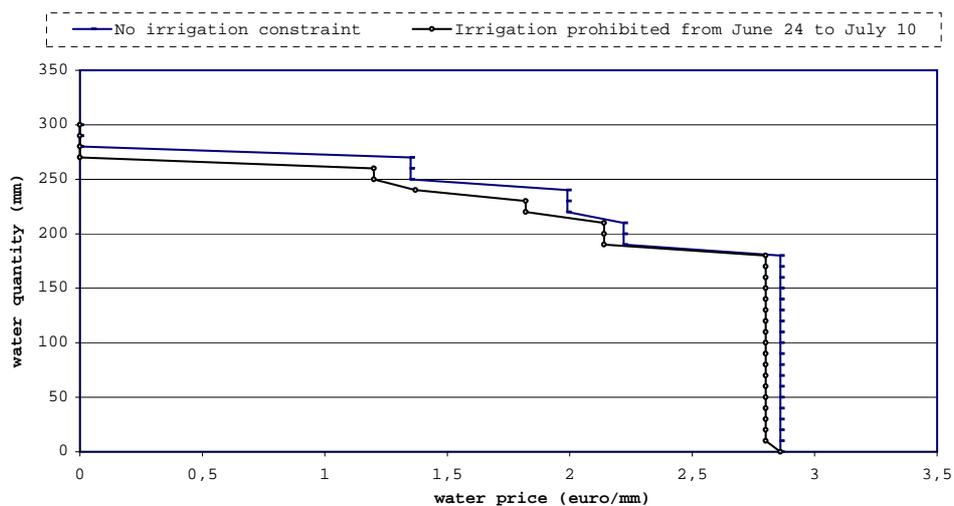


FIGURE E.1 – Impact of a restriction implemented from June 24 to July 10

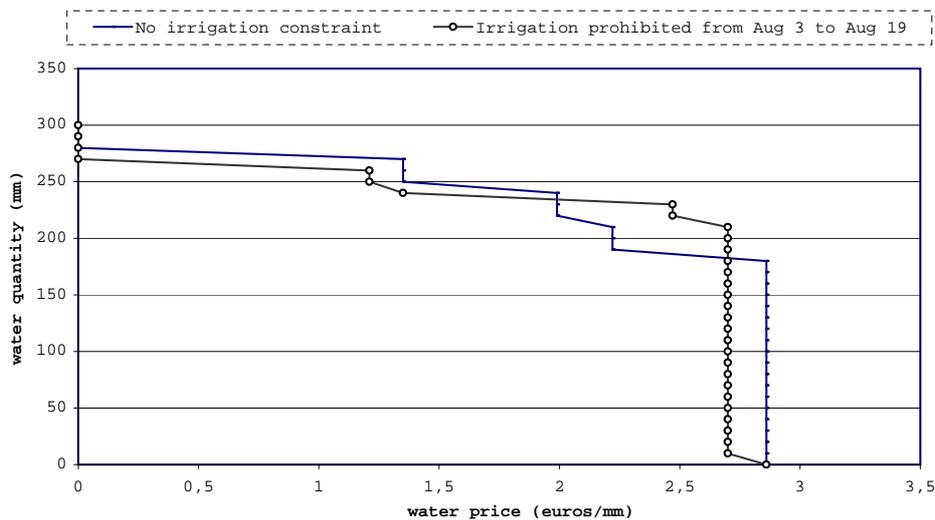


FIGURE E.2 – Impact of a restriction implemented from August 03 to August 19

Prohibiting irrigation from August 03 to August 19 may lead the farmer either to shift his demand function downward or upward. The adjustment of yearly water consumption depends on the unit price of the resource and potentially on other parameters. For instance, if the unit price of the resource is lower than 2 €/mm, the agricultural total water consumption is reduced compared to the consumption in the baseline case. On the contrary, if the unit price has been fixed between 2 €/mm and 2,5 €/mm, the annual water consumption is higher in the prohibited case than in the non-restricted one. Thus, irrigation rationing measures do not necessarily imply a decrease in irrigation water use. Consequences of a restriction are ambiguous because these depend both on “authorized dates” (dates at which irrigation is allowed) and water price.

E.6 Conclusion

In critical water scarcity situations, public authorities implement emergency measures such as temporary interdictions of agricultural water use. This paper has presented a bioeconomical

approach to assess the impact of an irrigation interdiction on water value and water demand function. A crop growth simulation model was coupled with a non linear programming model such that the farmer's optimization process was parameterized both by agronomic and economic data. We realized an empirical application for a representative farmer cultivating corn in Gers (Southwest of France). Results show that the impact of a restriction on farmer's water valuation depends on the amplitude and the date at which the measure is implemented. On one side, a "yield loss effect" entails a decrease in the hope value of the resource because of irrecoverable water stresses caused by the prohibition. On the other hand, a "drainage effect" increases the opportunity cost of using the resource because restricting irrigation in time makes it more costly to implement a without regret allocation. Hence, water value may be either decreased or increased by the measure, which is a non-obvious result. It follows that in some case, rationing of the irrigation activity imply a higher yearly water consumption.

E.7 Appendix

E.7.1 Proof of lemma 1

Proof of lemma 1 Let $\pi_d^*(\bar{Q})$ be the maximum feasible profit in a discrete distribution space for a quota level \bar{Q} :

$$\pi_d^*(\bar{Q}) = \arg \max \{ \pi_j, j \in S, q_j \leq \bar{Q} \} \in \mathbb{R}$$

Let $j_d^*(\bar{Q})$ be the strategy giving the maximum feasible profit in a discrete distribution space for a quota level \bar{Q} :

$$j_d^*(\bar{Q}) = \{ j / \pi_j = \pi_d^*(\bar{Q}), q_j \leq \bar{Q} \} \in \{1, \dots, J+1\}$$

Let $\pi_c^*(\bar{Q})$ be the maximum feasible profit in a continuous distribution space for a quota level \bar{Q} :

$$\pi_c^*(\bar{Q}) = \arg \max \left\{ \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j \pi_j, j \in S, \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j = 1, \gamma_j \geq 0, \sum_{j=1}^{J+1} \gamma_j q_j \leq \bar{Q} \right\} \in \mathbb{R}$$

Let $J_c^*(\bar{Q})$ the set of combined strategies l giving the maximum feasible profit in a continuous distribution space for a quota level \bar{Q} :

$$J_c^*(\bar{Q}) = \left\{ l / \sum_{l=1}^L \alpha_l \pi_l = \pi_c^*(\bar{Q}), \alpha_l > 0, \sum_{l=1}^L \alpha_l q_l \leq \bar{Q} \right\} \subset \{1, \dots, J+1\}$$

Let $\tilde{l} \in J_c^*(\bar{Q})$ be a strategy used at the optimum by the farmer in a continuous distribution space for a quota level \bar{Q} . We want to show that $\exists \bar{Q} / \tilde{l} = j_d^*(\bar{Q})$.

Assume $\nexists \bar{Q}$ such that $\tilde{l} = j_d^*(\bar{Q})$. Then $\tilde{l} \neq j_d^*(q_{\tilde{l}})$, where $q_{\tilde{l}}$ is the water quantity applied by the strategy \tilde{l} (ie. in a discrete distribution space, if a quota \bar{Q} for which \tilde{l} give the maximum feasible profit does not exist, then \tilde{l} is not the strategy giving the maximum feasible profit for a quota equal to $q_{\tilde{l}}$).

Hence, $\exists \hat{l} \neq \tilde{l} / \pi_{\hat{l}} = \pi_d^*(q_{\hat{l}}) > \pi_{\tilde{l}}$ and $q_{\hat{l}} \leq q_{\tilde{l}}$ (ie. in a discrete distribution space, we can found a strategy $\hat{l} \neq \tilde{l}$ giving a profit $\pi_{\hat{l}}$ equal to the maximum feasible profit for a quota level $q_{\hat{l}}$ and applying a water quantity $q_{\hat{l}} \leq q_{\tilde{l}}$). Therefore, for a quota level \bar{Q} , the maximum feasible profit in a continuous distribution space combining strategies $l, \forall l \neq \tilde{l}$, is higher than the maximum feasible profit combining \tilde{l} with others strategies.

\implies Inconsistent with the hypothesis stating $\tilde{l} \in J_c^*(\bar{Q})$.

E.7.2 Proof of proposition 1

Proof of proposition 1 Lemma 2 and lemma 3 state that the farmer select the vector $(\alpha_1^*, \dots, \alpha_k^*, \dots, \alpha_K^*)$ if :

1)

$$\sum_{k=1}^K \alpha_k^* \pi_d^*(q_k) \geq \pi_d^* \left(\sum_{k=1}^K \alpha_k^* q_k \right)$$

$$\text{with } \sum_{k=1}^K \alpha_k^* q_k \leq \bar{Q} \quad \forall \bar{Q}, \quad 0 \leq \alpha_k^* \leq 1 \quad \text{and} \quad \sum_{k=1}^K \alpha_k^* = 1$$

2) $\nexists (\hat{\alpha}_1, \dots, \hat{\alpha}_k, \dots, \hat{\alpha}_K)$ such that

$$\sum_{k=1}^K \hat{\alpha}_k \pi_d^*(q_k) > \sum_{k=1}^K \alpha_k^* \pi_d^*(q_k)$$

$$\text{with } \sum_{k=1}^K \hat{\alpha}_k q_k \leq \bar{Q} \quad \forall \bar{Q}, \quad 0 \leq \hat{\alpha}_k \leq 1, \quad \sum_{k=1}^K \hat{\alpha}_k = 1$$

$$\text{and } \sum_{k=1}^K \alpha_k^* q_k \leq \bar{Q} \quad \forall \bar{Q}, \quad 0 \leq \alpha_k^* \leq 1, \quad \sum_{k=1}^K \alpha_k^* = 1$$

Let $\Pi^c(q)$ be the farmer's profit function in a continuous distribution space. According to 1) and 2), $\forall q_1, \forall q_2$ and $\forall t \in [0, 1]$, we obtain :

$$\Pi^c(tq_1 + (1-t)q_2) \geq t\Pi^c(q_1) + (1-t)\Pi^c(q_2).$$

Graphical example :

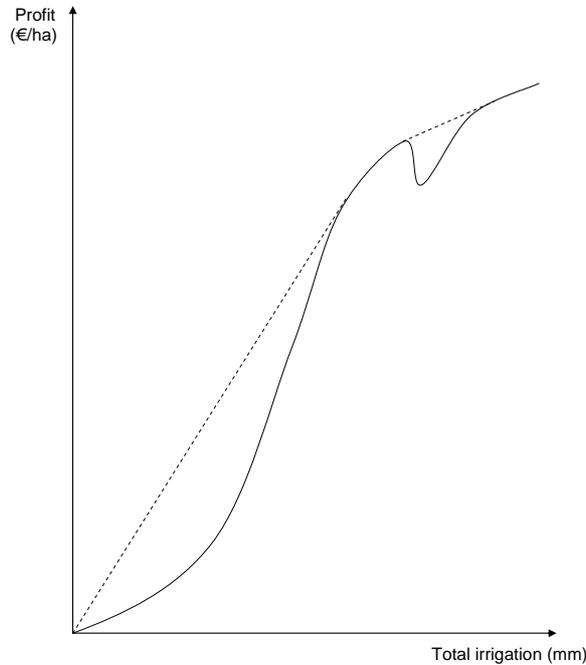


FIGURE E.3 – Quasi-concave profit function in a continuous distribution space of strategies

E.7.3 Distribution of strategies

The farmer's decision consists in choosing the profit maximizing combination of strategies. Results in tables E.7.1, E.7.2 and E.7.3 were generated in a continuous distribution space of strategies : the land is divided in cultivated and irrigated plots, cultivated but non irrigated plots and fallow plots. \bar{Q} is the quota (mm/ha), $J^*(\bar{Q})$ the set of strategies $\{j_l^*(\bar{Q})\}_{l=1}^L$ used for a quota \bar{Q} , $\Gamma_{j^*}^*(\bar{Q})$ the set of land fractions $\{\gamma_{j_l^*}^*(\bar{Q})\}_{l=1}^L$ on which are applied the strategies include in $J^*(\bar{Q})$ ⁵⁶, $q^*(\bar{Q})$ the total water quantity applied by strategies of $J^*(\bar{Q})$ weighted by $\Gamma_{j^*}^*(\bar{Q})$ (mm/ha), $\Pi^*(\bar{Q})$ the profit generated by strategies of $J^*(\bar{Q})$ weighted by $\Gamma_{j^*}^*(\bar{Q})$ (€/ha) et λ the marginal value of the quota (€/mm).

E.7.3.1 Baseline case (no restriction)

TABLE E.7.1 – Baseline case

\bar{Q}	q^*	J^*	$\gamma_{j^*}^*$	π^*	λ
(mm/ha)	(mm/ha)	[cf.†]		(€/ha)	(€/mm)
0	0	407313	1	-363,00	2,86
100	100	41916 407313	0,56 0,44	-77,11	2,86
200	200	41916 41949	0,33 0,67	195,96	2,22
300	270	42980	1	318,35	0

† Strategies are listed in appendix E.7.3.4.

E.7.3.2 Irrigation prohibited from June 24 to July 10

TABLE E.7.2 – Prohibition from June 24 to July 10

\bar{Q}	q^*	J^*	$\gamma_{j^*}^*$	π^*	λ
(mm/ha)	(mm/ha)	[cf.†]		(€/ha)	(€/mm)
0		407313	1	-363	2,86
100	100	39525	0,56	-82,72	2,8
200	200	39525 39558	0,33 0,67	184,23	2,14
300	270	40036	1	296,15	0

† Strategies are listed in appendix E.7.3.4.

56. $\gamma_{j_l^*}^*(\bar{Q})$ is the fraction of the land on which is applied the strategy $j_l^*(\bar{Q})$.

E.7.3.3 Irrigation prohibited from August 03 to August 19

TABLE E.7.3 – Prohibition from August 03 to August 19

\bar{Q}	q^*	J^*	$\gamma_{j^*}^*$	π^*	λ
(mm/ha)	(mm/ha)	[cf.†]		(€/ha)	(€/mm)
0		407313	1	-363	2,86
100	100	42868	0,48	-93,09	2,7
200	200	42868	0,95	176,83	2,7
300	270	42982	1	314,02	0

† Strategies are listed in appendix E.7.3.4.

E.7.3.4 List of implemented strategies

TABLE E.7.4 – Examples of Implemented strategies

Strategy number	Dose per period (mm/ha)														
	May 19	May 27	June 4	June 12	June 20	June 28	July 6	July 14	July 22	July 30	Aug. 7	Aug. 15	Aug. 23	Aug. 31	Sept. 8
39525	0	0	0	0	60	0	0	60	0	30	30	0	0	0	0
39558	0	0	0	0	60	0	0	60	0	30	60	0	0	0	0
40036	0	0	0	0	60	0	0	60	60	60	30	0	0	0	0
41916	0	0	0	0	60	0	60	0	0	30	30	0	0	0	0
41949	0	0	0	0	60	0	60	0	0	30	60	0	0	0	0
42868	0	0	0	0	60	0	60	60	0	30	0	0	0	0	0
42980	0	0	0	0	60	0	60	60	30	30	30	0	0	0	0
42982	0	0	0	0	60	0	60	60	30	60	0	0	0	0	0
407313	... < Fallow > ...														

E.7.4 Intra-annual water allocation for $\bar{Q} = 200$

E.7.5 Impact of irrigation restrictions on water value (exhaustive results)

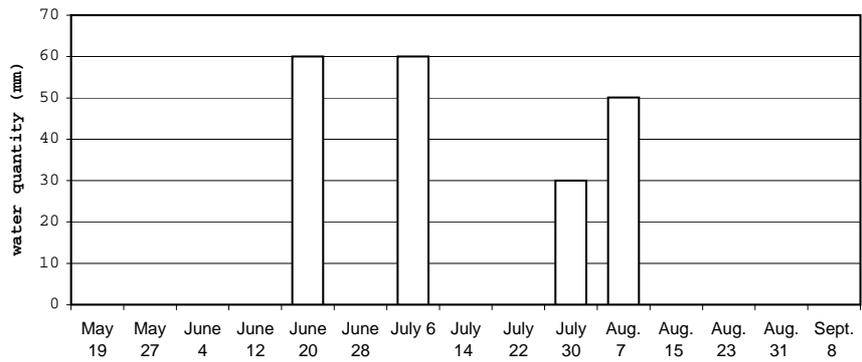


FIGURE E.4 – Baseline case (no restriction)

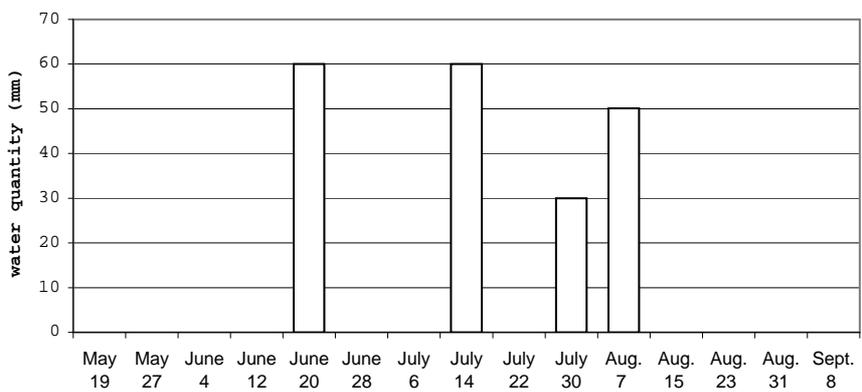


FIGURE E.5 – Irrigation prohibited from June 24 to July 10

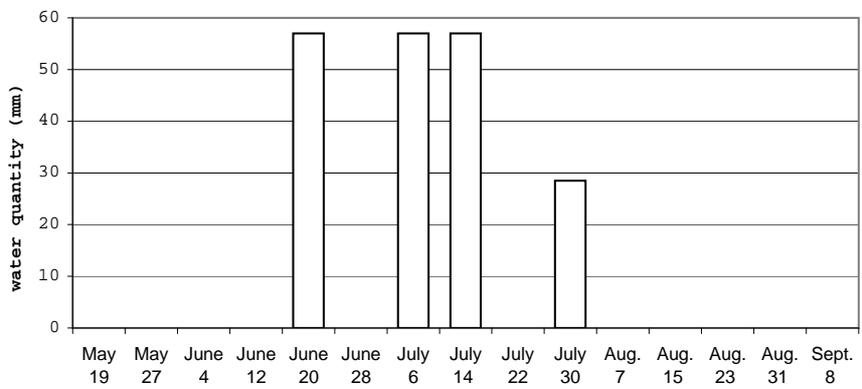


FIGURE E.6 – Irrigation prohibited from August 03 to August 19

TABLE E.7.5 – Quota and flow value depending on resource availability in time

Prohibited period (date)	$\bar{Q} = 100$			$\bar{Q} = 200$			$\bar{Q} = 300$		
	Π (€/ha)	λ (€/mm)	ϖ (€/mm)	Π (€/ha)	λ (€/mm)	ϖ (€/mm)	Π (€/ha)	λ (€/mm)	ϖ (€/mm)
- to May 05	-77,11 (=)*	2,86 (=)**	0	195,96 (=)*	2,22 (=)**	0	318,35 (=)*	0 (=)**	0
From May 23 to June 08	-77,11 (=)*	2,86 (=)**	0	195,96 (=)*	2,22 (=)**	0	318,35 (=)*	0 (=)**	0
From May 31 to June 16	-77,11 (=)*	2,86 (=)**	0	195,96 (=)*	2,22 (=)**	0	318,35 (=)*	0 (=)**	0
From June 08 to June 24	-88,78 (-15,13%)*	2,74 (-4,20%)**	0,17	177,02 (-9,67%)*	2,35 (5,86%)**	0,18	310,84 (-2,00%)*	0 (=)**	0,07
From June 16 to July 02	-88,78 (-15,13%)*	2,74 (-4,20%)**	0,17	172,43 (-12,01%)*	2,12 (-4,50%)**	0,31	288,08 (-9,51%)*	0 (=)**	0,73
From June 24 to July 10	-82,72 (-7,28%)*	2,80 (-2,10%)**	0,085	184,23 (-5,99%)*	2,14 (-3,60%)**	0,11	296,15 (-6,97%)*	0 (=)**	0,47
From July 02 to July 18	-84,56 (-9,66%)*	2,78 (-2,80%)**	0,15	176,24 (-10,06%)*	2,15 (-3,15%)**	0,27	289,75 (-8,98%)*	0 (=)**	0,43
From July 10 to July 26	-77,11 (=)*	2,86 (=)**	0,275	195,96 (=)*	2,22 (=)**	0,23	275,43 -13,48	0,24 (=)**	1,18
From July 18 to August 03	-89,65 (-16,26%)*	2,73 (-4,54%)**	0,51	183,70 (-6,26%)*	2,73 (22,97%)**	0,51	286,27 (-10,08%)*	0 (=)**	0,92
From July 26 to August 11	-95,58 (-23,95%)*	2,67 (-6,64%)**	0,55	169,43 (-13,54%)*	2,57 (15,77%)**	0,56	283,76 (-10,87%)*	0 (=)**	0,91
From Aug. 03 to August 19	-93,09 (-20,72%)*	2,70 (-5,59%)**	0,48	176,83 (-9,76%)*	2,70 (21,62%)**	0,48	314,02 (-1,36%)*	0 (=)**	0,12
From Aug. 11 to August 27	-77,11 (=)*	2,86 (=)**	0	195,96 (=)*	2,22 (=)**	0	318,35 (=)*	0 (=)**	0
From Aug. 19 to Sept. 04	-77,11 (=)*	2,86 (=)**	0	195,96 (=)*	2,22 (=)**	0	318,35 (=)*	0 (=)**	0
From Aug. 27 -	-77,11 (=)*	2,86 (=)**	0	195,96 (=)*	2,22 (=)**	0	318,35 (=)*	0 (=)**	0
Baseline case (no restriction)	-77,11 (=)*	2,86 (=)**	-	195,96 (=)*	2,22 (=)**	-	318,35 (=)*	0 (=)**	-

* Figures between brackets are profit variations beside the non restricted baseline case. The sign “=” indicate that the restriction implementation has no impact on the profit.

** Figures between brackets are variations of marginal value of quota beside the non restricted baseline case. The sign “=” indicates that the restriction implementation has no impact on the value of λ . These variations are equal to $+\infty$ when $\lambda = 0$ in the non restricted case.

E.7.6 Calibration of the plant growth model (Stics)

E.7.6.1 Soil characteristics

Soil parameters are known from chemical or physical analyses. Most of the calibration was done thanks to pedologic studies realized by CACG in the 1960's (survey data freely accessible from the Midi-Pyrénées chamber of agriculture). However, we also used parameter values found in the literature to complete missing data (as for albedo, potential soil evaporation threshold or minimal soil moisture threshold). Simulations were run on a soil presented in the following table :

TABLE E.7.6 – Soil surface horizon properties

Parameters	Place
	Auch (Gers)
Surface-layer clay content (%)	22.0
Organic nitrogen content in the soil moisture horizon (%)	0.12
Surface layer limestone content (%)	1.00
Albedo when dry	0.20 ^a
Soil evaporation accumulation during the potential phase (mm)	0.00
pH	7.00
Run-off coefficient (between 0 and 1)	0.00

^a Ritchie (1972), Brisson & Perrier (1991).

TABLE E.7.7 – Full soil profile properties

Parameters	Place
	Auch (Gers)
Moisture depth (cm)	35.00
Mineral nitrogen concentration protected from leaching ($\text{kgN}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{mm}^{-1}$)	0.00
Depth of obstacles to rooting (cm)	200
Capillary rising ($\text{mm}\cdot\text{j}^{-1}$)	10.0
Minimal moisture to capillary rising ($\text{g}^{\text{water}}/\text{g}^{\text{land}}$)	100.0
Waterproof depth (cm)	10

E.7.6.2 Climate characteristics

Daily climatic data are required : minimum and maximum temperatures ($^{\circ}\text{C}$), radiation (MJ/m^2), rainfall (mm) and Penman PET (mm). Data used come from a weather station located

TABLE E.7.8 – Soil hydrodynamic functioning parameters

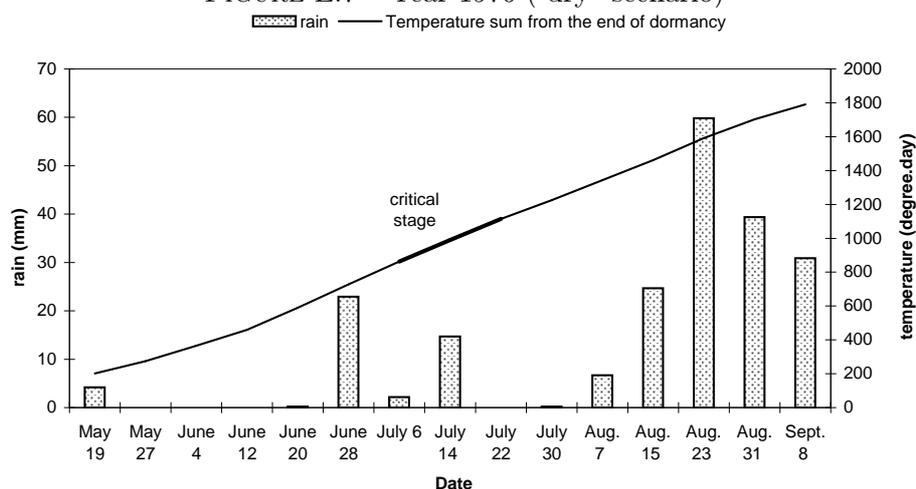
Horizon depth (cm)	Field capacity (g.g ⁻¹)	Permanent wilting point (g.g ⁻¹)	Bulk density	Stone content (%)	Type of stone	Infiltrability (mm/day)
0-25	22.50 ^a	8.50 ^a	1.16 ^a	10.00	limestone	50.00
25-55	25.40 ^a	11.60 ^a	1.29 ^a	10.00	limestone	50.00
55-90	25.80 ^a	15.30 ^a	1.15 ^a	0.00	limestone	50.00
90-120	28.70 ^a	19.00 ^a	0.91 ^a	5.00	limestone	50.00
120-	0.00 ^a	0.00 ^a	0.00 ^a	0.00	limestone	0.00

^a Jamagne & all (1977), Bastet & all (1998).

in the Baïses sector (Auch) and have been made available by ARCHE (Inra Department of Agronomy).

We ran simulations on two weather scenarios depicted in the following figure :

FIGURE E.7 – Year 1976 (“dry” scenario)



E.7.6.3 Plant phenology

The plant developmental stage is based on the accumulation of thermal units (ATU), i.e. the sum of the daily thermal units calculated by averaging maximum and minimum temperature and subtracting a base temperature of 6 °C (Muchow et al., 1990). Simulating corn crop growth requires to state the following parameters⁵⁷ :

E.7.6.4 Cultural operations planning

Crop management parameters incorporated into the model are summarized in the following table :

57. Note that other more technical parameters should be precised as well.

TABLE E.7.9 – Development stages (foliar index)

Development stage	ATU (degree-day)
End of the juvenile phase	275 [†]
End of the net foliar index growth	825 [†]
Beginning of the senescence period	1588 [†]
Physiological maturity	1785 [†]

[†]ATU from the vegetative budburst.

TABLE E.7.10 – Crop management

Operation	Date (Julian day)	Depth (cm)	Other characteristics
Soil tillage	112	25	Tillage supply organic residues to the soil. Residues are characterized by a fresh matter quantity (1 tonne/ha), a carbon proportion (42%), and a “Carbon/Nitrogen” ratio (60%).
Fertilization	112	0	An application of 200 kg/ha ammonium nitrate fertilizer is made. Notice that water irrigation also provide mineral nitrogen throughout the season (mineral water concentration parameterized to 0.109999999 kgN/mm).
Sowing	116	5	Sowing density is put equal to 9,5 plants/ m^2 . The crop is a corn late growing variety ^a .
Harvesting	-	-	Harvest occurs when water(grain)<0319999993 g/g of fresh matter. A cut-off date is set to the October 26th or 27th (Julian day 300).

^a A variety is defined by development units accumulation (sum of degree days) between the different phenological stages (vegetative and filling ones), possibly multiplied by a photoperiodic or a vernalisation limiting factor.

Conclusion

D'après les projections, la population mondiale aura augmenté d'un tiers en 2030 [USCB, 2010], ce qui exigera d'augmenter la production agricole de 50% [Gurria, 2010]. Si l'agriculture pluviale joue encore un rôle dominant (60% de la production dans les pays en développement [FAO, 2004]), l'irrigation constitue un outil de gestion efficace contre les aléas des précipitations et l'on peut s'attendre à ce que les prélèvements augmentent rapidement. L'eau est par conséquent vitale pour assurer la satisfaction des besoins alimentaires. Mais cette ressource est mal gérée dans le monde et n'est pas utilisée de manière durable. Elle n'est pas allouée systématiquement là où elle est le plus utile et sa qualité se dégrade.

Il a été mis en évidence dans le premier chapitre qu'aucune doctrine claire ne se dégage sur le meilleur moyen de la gérer, ni sur son mode d'administration le plus approprié. On observe au contraire un panachage de politique de marché et d'intervention directe sans certitude établie sur les avantages et les inconvénients de chacune des options. L'instauration d'une politique de gestion nécessite au préalable de connaître précisément les demandes des différents usagers de la ressource et la répartition la plus efficace de ses disponibilités. Il convient alors de proposer des méthodes permettant de les évaluer.

L'apport de cette thèse est principalement méthodologique. Un nombre important de travaux se sont intéressés à la demande agricole de l'eau. Ils suivent généralement des approches économétriques ou de programmation mathématique et cherchent à déterminer l'allocation de la ressource à l'échelle de la parcelle ou de la ferme. Cette thèse a proposé une méthodologie originale permettant d'évaluer les valorisations de l'eau d'irrigation pour différentes cultures et différents agriculteurs (hétérogènes de par leurs caractéristiques agronomiques), localisés dans une petite région agricole. Cette modélisation a également permis de dériver la réaction des irrigants à différentes contraintes imposées sur l'usage de l'eau (disponibilité du flux de ressource par période par exemple).

La principale démarche a consisté à coupler un modèle de simulation biophysique avec un modèle économique d'optimisation non linéaire. Cette approche présente l'intérêt de résoudre le problème de l'indisponibilité des données nécessaires pour réaliser une étude économétrique. La simulation d'un grand nombre d'itinéraires d'irrigation a ainsi permis de déterminer avec précision les fonctions de rendements pour différentes cultures et différents environnements pédo-climatiques. En appliquant un processus d'optimisation sur la relation ainsi identifiée entre l'apport d'eau et le rendement, nous avons pu déterminer les choix d'usage optimaux des irrigants pour différents contextes réglementaire, économique ou climatique. Cette modélisation est en ce sens intégrée puisqu'elle incorpore de façon simultanée des paramètres agronomiques et économiques.

Dans le deuxième chapitre, nous avons tout d'abord montré qu'il est possible de reconstituer la fonction de demande en eau -même lorsque les fonctions de croissance biologiques des plantes présentes des non convexités locales- grâce à un processus de convexification de l'ensemble de production de l'irrigant. Cela suppose cependant que les apports d'eau au champ ne sont contraints que par la disponibilité en ressource et pas par un autre facteur. Ainsi, une régulation par les prix de l'usage de l'irrigation n'aura pas les effets souhaités si l'exploitant est contraint par son équipement d'arrosage.

L'impact d'un arrêté d'interdiction de l'irrigation a été étudié dans le chapitre trois. Nous avons montré que cette mesure autoritaire de contrôle d'usage de la ressource peut conduire à une consommation annuelle plus importante qu'en situation non régulée. Sous certaines conditions, l'agriculteur aura intérêt à effectuer des apports plus importants aux périodes où l'irrigation n'est pas prohibée, ce qui entraîne un phénomène de gaspillage (le drainage est plus important). La pertinence de ce dispositif d'urgence est ainsi contingente à la réaction de l'irrigant face à la mise en œuvre de ce dispositif là.

Le quatrième chapitre aborde le problème du partage d'une ressource en eau rare entre différents agriculteurs hétérogènes soumis au risque climatique. Nous avons proposé un modèle d'allocation régional de l'eau incorporant un programme de décision individuel des choix d'assolement et d'usage de l'eau. L'écriture des deux modèles de manière intégrée garantit que les choix de cultures des agriculteurs sont endogènes au partage de la ressource mis en œuvre par le gestionnaire. Celui-ci détermine ainsi l'allocation entre usagers qui est la plus efficace en tenant compte de la réaction des irrigants à cette allocation là. L'impact du climat -un événement aléatoire représenté par une distribution de probabilité- a été considéré au travers de fonctions

de production agricoles climato-contingentes, économétriquement estimées à partir de données simulées par un modèle de croissance des cultures.

Ces travaux s'inscrivent dans une réflexion sur les modalités économiques de l'action publique dans le domaine de la gestion de l'eau et plus particulièrement de ses usages agricoles. Ils s'inscrivent dans le prolongement des recherches déjà effectuées aux niveaux parcellaire ou de l'exploitation et constituent une avancée pour la réflexion menée sur les problèmes d'allocation de la ressource à de plus grandes échelles. Le modèle de partage de la ressource entre irrigants d'une petite région agricole pourrait par exemple être intégré dans un modèle d'allocation plus global à l'échelle d'un bassin de rivière. Une des perspectives qui semblerait particulièrement intéressante serait de développer une méthodologie permettant d'intégrer les modèles développés dans cette thèse à une modélisation du système hydrographique. Il est possible d'imaginer une représentation dans laquelle les différentes régions agricoles du bassin seraient en compétition pour la ressource, le modèle l'allouant à celles qui la valorisent le mieux. Dans ce cadre, il est également envisageable de considérer les autres usages de l'eau, comme ceux des villes, des industries ou de l'environnement aquatique.

Une autre extension possible de ce travail consiste à s'intéresser aux moyens de mettre en œuvre l'allocation optimale de façon non autoritaire. Les tentatives de réformes du secteur de l'eau visent aujourd'hui à décentraliser l'allocation au niveau des usagers au travers de systèmes de tarification. Dans le domaine de l'agriculture en particulier, le prix de l'eau payé par les agriculteurs ne reflète que rarement la rareté de la ressource ou les valeurs sociales et environnementales qui y sont attachées. Le recours aux instruments économiques reste aujourd'hui limité et un des enjeux futur de la gouvernance du secteur sera de mettre en place des politiques de gestion nouvelles qui garantissent le bien-être des consommateurs et des écosystèmes. J'ai l'espoir que les méthodes développées dans cette thèse contribueront aux recherches futures dans ce domaine.

Bibliographie

- [Agreste, 2001] Agreste (2001). Enquête agreste sur les pratiques culturales sur grandes cultures. Ministère de l’agriculture, de la pêche et de l’alimentation (France).
- [Allain, 2000a] Allain, S. (2000a). Application de la loi sur l’eau et processus de négociation. Limiter l’irrigation sans nuire à la production agricole. *Annales des mines - Gérer et comprendre*, 60 :20–30.
- [Allain, 2000b] Allain, S. (2000b). La mise en place de systèmes de gestion volumétrique en Poitou-Charentes. Technical report, INRA-AC3A.
- [Allain, 2006] Allain, S. (2006). Gestion collective localisée. In Amigues, J.-P., Debaeke, P., Itier, B., Lemaire, G., Seguin, B., Tardieu, F., and Thomas, A., editors, *Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l’agriculture à un risque accru de manque d’eau*. INRA (France).
- [Amigues et al., 2006] Amigues, J.-P., Debaeke, P., Itier, B., Lemaire, G., Seguin, B., Tardieu, F., and Thomas, A. (2006). Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l’agriculture à un risque accru de manque d’eau. Technical report, INRA (France).
- [Anderson and Snyder, 1997] Anderson, T. and Snyder, P. (1997). *Water markets. Priming the invisible pump*. CATO Institute, Washington D.C.
- [Bar-Shira et al., 2006] Bar-Shira, Z., Finkelshtain, I., and Simhon, A. (2006). Block-rate versus uniform water pricing in agriculture : an empirical analysis. *American Journal of Agricultural Economics*, 88(4) :986–999.
- [Barkaoui and Butault, 2004] Barkaoui, A. and Butault, J. (2004). Impacts sur l’offre des régions françaises des différentes options de la réforme de la pac de 2003. *INRA Sciences Sociales*.
- [Bauer, 2004] Bauer, C. (2004). Results of Chilean water markets : empirical research since 1990. *Water Resources Research*, 40(9) :1–11.
- [Bazzani et al., 2004] Bazzani, G. M., Gallerani, V., Viaggi, D., Raggi, M., and Bartolini, F. (2004). The sustainability of irrigated agriculture in Italy under water and agricultural policy

- scenarios. 9th Joint Conference on Food, Agriculture and the Environment August 28th - September 1st 2004.
- [Beare et al., 1998] Beare, S. C., Bell, R., and Fisher, B. S. (1998). Determining the value of water : the role of risk, infrastructure constraints, and ownership. *American Journal of Agricultural Economics*, 80(5) :916–940.
- [Berbel and Gomez-Limon, 2000] Berbel, J. and Gomez-Limon, J. A. (2000). The impact of water-pricing policy in Spain : an analysis of three irrigated areas. *Agricultural Water Management*, 43 :219–238.
- [Berck et al., 2000] Berck, P., Geoghegan, J., and Stohs, S. (2000). A strong test of the von liebig hypothesis. *American Journal of Agricultural Economics*, 82 :948–955.
- [Bernardo et al., 1988] Bernardo, D., Whittlesey, N., Saxton, K., and Bassett, D. (1988). Valuing irrigation water : a simulation/mathematical programming approach. *Water Resources Bulletin*, 24 :149–157.
- [Bertin et al., 2005] Bertin, M., Combes, B., Levy, J., Mazodier, J., and Roux, A. (2005). Irrigation durable. Technical report, CGGREF - Ministère de l’agriculture, de l’alimentation, de la pêche et de la ruralité (France).
- [Bontemps and Couture, 2002] Bontemps, C. and Couture, S. (2002). Irrigation water demand for the decision maker. *Environment and Development Economics*, 7 :643–657.
- [Bontemps et al., 2004] Bontemps, C., Couture, S., and Favard, P. (2004). Is the irrigation water demand really convex? In Koudouri, P., editor, *Econometrics informing natural resources management : selected empirical analysis*. Edward-Elgar Publishers.
- [Brisson et al., 2003] Brisson, N., Gary, C., Justes, E., Roche, R., Mary, B., Ripoche, D., Zimmer, D., Sierra, J., Bertuzzi, P., Burger, P., Bussi ere, F., Cabidoche, Y., P.Cellier, Debaecke, P., Gaudill ere, J., Hénault, C., Maraux, F., Seguin, B., and Sinoquet, H. (2003). An overview of the crop model stics. *European Journal of Agronomy*, 18 :309–332.
- [Bryant et al., 1993] Bryant, K., Mjelde, J., and Lacewell, R. (1993). An intraseasonal dynamic optimization model to allocate irrigation water between crops. *American Journal of Agricultural Economics*, 75 :1021–1029.
- [Buisson, 2008] Buisson, G. (2008). Les effets de la réforme de la PAC sur la consommation d’eau agricole : simulation des impacts du découplage des aides. Technical report, *Notes et Etudes Economiques* 31 : 81-102. Ministère de l’Agriculture et de la Pêche - Service de la Statistique et de la Prospective.

- [Burak, 2002] Burak, S. (2002). Politiques de l'eau des pays méditerranéens. synthèse régionale des dossiers pays (pays du sud et de l'est). Technical report, Plan Bleu, United Nations Environment Programme.
- [Burtless and Hausman, 1978] Burtless, G. and Hausman, J. (1978). The effect of taxation on labor supply : evaluating the gary negative income tax experiment. *Journal of Political Economy*, 86(6) :1103–1130.
- [Butault and Delame, 2004] Butault, J. and Delame, N. (2004). Réforme de la PAC de 2003, découplage et évolution des structures et des systèmes de production agricole en France. Colloque SFER, Lille, 19 pages.
- [Cemagref and Cacg, 2005] Cemagref and Cacg (2005). Projet adeaupi - aide à la décision pour la gestion de l'eau en périmètres irrigués : WP 500 analyse économique. Technical report, Ministère de L'Economie, des Finances et de l'Industrie.
- [Cetiom, 2006] Cetiom (2006). OleOTEC, lettre technique régionale. Centre Technique Interprofessionnel des Oléagineux Métropolitains.
- [Chambers and Lichtenberg, 1996] Chambers, R. and Lichtenberg, E. (1996). A nonparametric approach to the von liebig-paris technology. *American Journal of Agricultural Economics*, 78(2) :373–386.
- [Chartzoulakis et al., 2001] Chartzoulakis, K. S., Paranychianakis, N. V., and Angelakis, A. N. (2001). Water resources management in the island of Crete, Greece, with emphasis on the agricultural use. *Water Policy*, 3 :193–205.
- [Chavas and Holt, 1990] Chavas, J.-P. and Holt, M. (1990). Acreage decisions under risk : The case of corn and soybeans. *American Journal of Agricultural Economics*, 72 :529–538.
- [Cheng et al., 1996] Cheng, L., Ha, M., Lee, E., and Wu, C. (1996). Convexification of nonconvex functions and application to minimum and maximum principles for nonconvex sets. *Computers & Mathematics with Applications*, 31(7) :27–36.
- [Chohin-Kuper et al., 2002] Chohin-Kuper, A., Rieu, T., and Montginoul, M. (2002). Les outils économiques pour la gestion de la demande en eau pour la méditerranée. Technical report, Cemagref. Forum Avancées de la gestion de la demande en eau dans la région méditerranéenne, Fiuggi 3-5 Octobre 2002, 34 p.
- [Chohin-Kuper et al., 2003] Chohin-Kuper, A., Rieu, T., and Montginoul, M. (2003). Water policy reforms : pricing water, cost recovery, water demand and impact on agriculture. lessons

- from the mediterranean experience. Water pricing seminar, Agencia Catalana del Agua & World bank Institute.
- [Clavel and Leenhardt, 2008] Clavel, L. and Leenhardt, D. (2008). Development of matrices to build scenarios of cropping systems distribution for integrated catchment assessment. a proposition for an irrigated area in south-western france. Mimeo, UMR1248 INRA-INSAT AGIR.
- [Collins et al., 2009] Collins, R., Kristensen, P., and Thyssen, N. (2009). Water resources across europe - confronting water scarcity and drought. Technical report, European Environment Agency, Copenhagen.
- [Commission de Coopération Environnementale, 2001] Commission de Coopération Environnementale (2001). *Le droit et les politiques de l'environnement en Amérique du Nord*. Edition Yvon Blais, Montréal, Canada.
- [Conradie and Hoag, 2004] Conradie, B. and Hoag, D. (2004). A review of mathematical programming models of irrigation water values. *Water SA*, 30 :287–292.
- [COPA-COGECA, 2003] COPA-COGECA (2003). Assessment of the impact of the heat wave and drought of the summer 2003 on agriculture and forestry. Technical report, Committee of Agricultural Organisations in the European Union / General Confederation of Agricultural Cooperatives in the European Union.
- [Cornish et al., 2004] Cornish, G., Bosworth, B., Perry, C., and Burke, J. (2004). Water charging in irrigated agriculture : An analysis of international experience. Technical report, Food and Agriculture Organization Waters Reports 28, Rome, Italy.
- [Costejà et al., 2002] Costejà, M., Font, N., Rigol, A., and Subirats, J. (2002). The evolution of the national water regime in Spain. Universitat Autònoma de Barcelona (UAB), 27 pages.
- [Couture, 2000] Couture, S. (2000). *Aspects dynamiques et aléatoires de la demande en eau d'irrigation*. Thèse, Université des Sciences-Sociales de Toulouse.
- [Destro, 1997] Destro, S. (1997). Italy. In Dinar, A. and Subramanian, A., editors, *Water pricing experiences : an international perspective*. World Bank Technical Paper No. 386, Washington D.C.
- [Dinar, 2000] Dinar, A. (2000). *The Political Economy of Water Pricing Reforms*. Oxford University Press, Washington DC.
- [Dinar et al., 1997] Dinar, A., Rosegrant, M., and Meinzen-Dick, R. (1997). Water allocation mechanisms : Principles and examples. World Bank Policy Research Working Paper No. 1779.

- [Dinar and Subramanian, 1997] Dinar, A. and Subramanian, A. (1997). Pricing experiences : an international perspective. Technical report, World Bank Paper No. 386, Washington D.C.
- [Doppler et al., 2002] Doppler, W., Salman, A. Z., Al-Karablieh, E. K., and Wolff, H.-P. (2002). The impact of water price strategies on the allocation of irrigation water : the case of the Jordan valley. *Agricultural Water Management*, 55(3) :171–182.
- [Dudley et al., 1971] Dudley, N., Howell, D., and Musgrave, W. (1971). Optimal intraseasonal irrigation water allocation. *Water Resource Research*, 7(4) :770–788.
- [EEA, 2001] EEA (2001). Sustainable water use in Europe. Part 3 : Extreme hydrological events : floods and droughts. Technical report, European Environmental Agency, Copenhagen.
- [EEA, 2004] EEA (2004). Mapping the impacts of recent natural disasters and technological accidents in Europe. Technical report, European Environmental Agency, Copenhagen.
- [FAO, 2004] FAO (2004). Economic valuation of water resources in agriculture. Technical report, Food and Agriculture Organization Water Reports, Rome.
- [Faux and Perry, 1999] Faux, J. and Perry, G. M. (1999). Estimating irrigation water value using hedonic price analysis : a case study in Malheur county, Oregon. *Land Economics*, 75(3) :440–452.
- [Flichman and Jacquet, 2003] Flichman, G. and Jacquet, F. (2003). Le couplage des modèles agronomiques et économiques : intérêt pour l’analyse des politiques. *Cahiers d’économie et sociologie rurales*, 67 :51–70.
- [Flichman and Louhichi, 2008] Flichman, G. and Louhichi, K. (2008). Some conceptual issues concerning the way to model the relations between agriculture and environment using bio-economic mathematical programming models. Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier.
- [Gardner and Warner, 1994] Gardner, B. D. and Warner, J. (1994). The central valley water project improvement act and water markets : Two steps forward-and one step back. *Choices*, pages 4–10.
- [Garrido, 1999] Garrido, A. (1999). Tarification de l’eau à usage agricole dans les pays de l’OCDE. Technical report, ENV/EPOC/GEEI(98)11/FINAL, Organisation de Coopération et de Développement Economiques, Paris.
- [Georgiou et al., 2006] Georgiou, P., Papamichail, D., and Vougioukas, S. (2006). Optimal irrigation reservoir operation and simultaneous multi-crop cultivation area selection using simulated annealing. *Irrigation and Drainage*, 55 :129–144.

- [Gohin and Moschini, 2006] Gohin, A. and Moschini, G. (2006). Evaluating the market and welfare impacts of agricultural policy in developed countries. Comparison of partial and general equilibrium measures. *Review of Agricultural Economics*, 28(2) :195–211.
- [Guha-Sapir et al., 2004] Guha-Sapir, D., Hargitt, D., and Hoyois, P. (2004). Thirty years of natural disasters 1974-2003 : The numbers. Technical report, Presses Universitaires de Louvain : Louvain-la Neuve.
- [Gurria, 2010] Gurria, A. (2010). L'approche économique de l'eau. In *Les instruments économiques, financiers et fiscaux de la gestion de l'eau en France et dans le Monde*. OCDE.
- [Hamilton et al., 1987] Hamilton, J. R., Whittlesey, N. K., and Halverson, P. (1987). Interruptible water markets in the Pacific Northwest. *American Journal of Agricultural Economics*, 71 :63–75.
- [Hanemann, 1997] Hanemann, W. (1997). Price and rate structure (chap. 5). In Bauman, D. D., Boland, J. J., and Hanemann, W. M., editors, *Urban water demand management and planning*. McGraw-Hill, New York.
- [Hassine and Thomas, 2001] Hassine, B. and Thomas, A. (2001). Aversion au risque des agriculteurs et décisions de production : le cas de l'agriculture irriguée en tunisie. *Economie Rurale*, 266 :91–108.
- [Hearne and Easter, 1998] Hearne, R. R. and Easter, K. W. (1998). Economic and financial returns from Chile's water markets. In Easter, K. W., Rosegrant, M. W., and Dinar, A., editors, *Market for water : potential and performance*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [Horbulyk, 1997] Horbulyk, T. M. (1997). Canada. In Dinar, A. and Subramanian, A., editors, *Water pricing experiences : an international perspective*. World Bank Technical Paper No. 386, Washington D.C.
- [Horbulyk and Lo, 1998] Horbulyk, T. M. and Lo, L. J. (1998). Potential water markets in Alberta, Canada. In Easter, K. W., Rosegrant, M. W., and Dinar, A., editors, *Market for water : potential and performance*. Kluwer Academic Publishers, Boston.
- [Hüsseinov, 1997] Hüsseinov, F. (1997). Characterization of spannability of functions. *Journal of Mathematical Economics*, 28 :29–40.
- [IES, 2005] IES (2005). Climate change and the European water dimension. Technical report, Institute for Environment and Sustainability of the Joint Research Center (JRC), Ispra.
- [JO, 1992] JO (1992). Loi n° 92-3 du 3 janvier 1992 sur l'eau. Journal Officiel No 3 du 4 janvier 1992.

- [Johansson, 2000] Johansson, R. (2000). Pricing irrigation water : a literature survey. World Bank Policy Research Working Paper No. 2449.
- [Johansson, 2005] Johansson, R. C. (2005). Micro and macro-level approaches for assessing the value of irrigation water. World Bank Policy Research Working Paper No. 3778.
- [Johnson, 1997] Johnson, S. H. (1997). Irrigation management transfer : decentralizing public irrigation in Mexico. *Water International*, 22(3) :159–167.
- [Keplinger et al., 1998] Keplinger, K. O., McCarl, B. A., Chowdhury, M. E., and Lacewell, R. D. (1998). Economic and hydrologic implications of suspending irrigation in dry years. *Journal of Agricultural and Resources Economics*, 23(1) :191–205.
- [Knox and Weatherhead, 2003] Knox, J. W. and Weatherhead, E. K. (2003). Trickle irrigation in England and Wales. Technical report, water resources R&D project W6-070/TR. Environment Agency, Bristol, UK.
- [Krogh, 1995] Krogh, A. L. (1995). Water right adjudications in the western states : procedures, constitutionality, problems and solutions. *Land and Water Law Review*, 30(1) :9–56.
- [Kulshreshta et al., 1991] Kulshreshta, S., Suren, N., and Tewari, D. (1991). Value of water in irrigated crop production using derived demand functions : a case study of south saskatchewan river irrigation district. *Water Resources Bulletin*, 27 :227–236.
- [Lallana et al., 2001] Lallana, C., Krinner, W., Estrela, T., Nixon, S., Leonard, J., and Berland, J. M. (2001). Sustainable water use in europe - part 2 : Demand management. Technical report, European Environment Agency, Copenhagen.
- [Livingston, 1998] Livingston, M.-L. (1998). Institutional requisites for efficient water markets. In Easter, W. K., Rosegrant, M. W., and Dinar, A., editors, *Markets for water. Potential and performance*. Kluwer Academic Publisher.
- [Mas-Colell et al., 1995] Mas-Colell, A., Whinston, M., and Green, J. (1995). *Microeconomic theory*. Oxford University Press.
- [Mastrorilli, 1997] Mastrorilli, M. (1997). Italy : the Capitanata irrigation scheme in southern Italy : experience in water sustainability. Workshop on the sustainable management of water in agriculture : Issues and Policies, Athens.
- [Maton et al., 2005] Maton, L., Leenhardt, D., Goulard, M., and Bergez, J. (2005). Assessing the irrigation strategies over a wide geographical area from structural data about farming systems. *Agricultural Systems*, 86 :293–311.

- [McGuckin et al., 1987] McGuckin, J. T., Mapel, C., Lansford, R., and Sammis, T. (1987). Optimal control of irrigation scheduling using a random time frame. *American Journal of Agricultural Economics*, 69(1) :123–133.
- [Meinzen-Dick and Jackson, 1997] Meinzen-Dick, R. S. and Jackson, L. A. (1997). Multiple uses, multiple users of water resources. Paper presented at the Environment and Production Technology Division workshop, International Food Policy Research Institute, Washington, D.C.
- [Mesa-Jurado et al., 2008] Mesa-Jurado, M. A., Pistón, J., Giannoccaro, G., and Berbel, J. (2008). Irrigation water value scenarios for 2015 : Application to Guadalquivir river. Paper prepared for presentation at the 107th EAAE Seminar “Modelling of Agricultural and Rural Development Policies”, Seville, Spain.
- [Michelsen and Young, 1993] Michelsen, A. M. and Young, R. A. (1993). Optioning agricultural water rights for urban water supplies during drought. *American Journal of Agricultural Economics*, 75 :1010–1020.
- [Moore et al., 1994a] Moore, M., Gollehon, N., and Carrey, M. (1994a). Alternative models of input allocation in multicrop systems : irrigation water in the central plains, United States. *Agricultural Economics*, 11 :143–158.
- [Moore et al., 1994b] Moore, M., Gollehon, N., and Carrey, M. (1994b). Multicrop production decisions in western irrigated agriculture : the role of water price. *American Journal of Agricultural Economics*, 76(4) :859–874.
- [Moore and Negri, 1992] Moore, M. and Negri, D. (1992). A multicrop production model of irrigated agriculture, applied to water allocation policy of the Bureau of Reclamation. *Journal of Agricultural and Resources Economics*, 17 :30–43.
- [Murtagh et al., 2006] Murtagh, B., Saunders, M., Murray, W., and Gill, P. (2006). *MINOS - Solver manual*. GAMS Development Corporation, Washington D.C.
- [Musgrave, 1997] Musgrave, W. F. (1997). Australia. In Dinar, A. and Subramanian, A., editors, *Water pricing experiences : an international perspective*. World Bank Technical Paper No. 386, Washington D.C.
- [Nakashima, 1997] Nakashima, Y. J. (1997). The Japanese experience with sustainable water use in agriculture : existing systems and the possibility of introducing market mechanisms. Workshop on the sustainable management of water in agriculture : Issues and Policies, Athens.
- [Norwood and Dumier, 2002] Norwood, C. and Dumier, T. (2002). Transition to dryland agriculture : limited irrigated vs. dryland corn. *Agronomy Journal*, 94 :310–320.

- [OCDE, 2008] OCDE (2008). La performance environnementale de l'agriculture dans les pays de l'OCDE depuis 1990 - Section par pays : Grèce. Technical report, Organisation de Coopération et de Développement Economiques, Paris.
- [Ogg and Gollehon, 1989] Ogg, C. and Gollehon, N. (1989). Western irrigation response to pumping costs : a water demand analysis using climatic regions. *Water Resource Research*, 25 :767–773.
- [OIEau, 2007] OIEau (2007). L'eau dans le Grenelle de l'environnement : une synthèse des propositions. Office International de l'Eau.
- [Oriade and Dillon, 1997] Oriade, C. A. and Dillon, C. (1997). Developments in biophysical and bioeconomic simulation of agricultural systems : a review. *Cahiers d'économie et sociologie rurales*, 17 :45–58.
- [Paris, 1992] Paris, Q. (1992). The von liebig hypothesis. *American Journal of Agricultural Economics*, 74 :1019–1028.
- [Peterson and Ding, 2005] Peterson, J. and Ding, Y. (2005). Economic adjustments to groundwater depletion in the high plains : do water-saving irrigation systems save water? *American Journal of Agricultural Economics*, 87(1) :148–160.
- [Pigram, 1999] Pigram, J. J. (1999). Economic instruments in the management of australia's water resources : a critical review. *Water Resources Development*, 4 :493–509.
- [Pinheiro and Saraiva, 2005] Pinheiro, A. C. and Saraiva, J. (2005). The case of Portugal. In Berbel, J. and Gutiérrez, C., editors, *WADI - The sustainability of european irrigated agriculture under Water Framework Directive and Agenda 2000*, pages 177–200. European Commission, Joint Research Center, Institute of Prospective Technological Studies, Seville, Spain.
- [Polomé et al., 2006] Polomé, P., Harmignie, O., and de Frahan, B. (2006). Farm-level acreage allocation under risk. Selected paper prepared for presentation at the American Agricultural Economics Association annual meeting, Long Beach, California.
- [Poupa, 2006] Poupa, J.-C. (2006). Rétro-ingénierie de programmes fortran. Application au modèle de simulation STICS. Mimeo, INRA, Rennes.
- [PRI, 2005] PRI (2005). Economic instruments for water demand management in an integrated water resources management framework. Policy Research Initiative symposium, Ottawa.
- [Pörn et al., 1999] Pörn, R., Harjunkski, I., and Westerlund, T. (1999). Convexification of different classes of non-convex minlp problems. *Computers and Chemical Engineering*, 23 :439–448.

- [Rae, 1971] Rae, A. (1971). Stochastic programming, utility, and sequential decision problems in farm management. *American Journal of Agricultural Economics*, 53 :448–460.
- [Rinaudo, 2002] Rinaudo, J.-D. (2002). Corruption and allocation of water : the case of public irrigation in pakistan. *Water Policy*, 4 :405–422.
- [Rose, 2004] Rose, C. (2004). Common property, regulatory property, and environmental protection : Comparing community-based management to tradable environmental allowances. In *The Drama of the Commons*. National Academy Press, Washington DC.
- [Rosenthal, 2008] Rosenthal, R. (2008). *GAMS : A User's Guide*. GAMS Development Corporation, Washington D.C.
- [Saleth, 1997] Saleth, M. R. (1997). India. In Dinar, A. and Subramanian, A., editors, *Water pricing experiences : an international perspective*. World Bank Technical Paper No. 386, Washington D.C.
- [Saleth and Dinar, 1999] Saleth, R. and Dinar, A. (1999). Water challenge and institutional response (a cross-country perspective). World Bank Policy Research Working Paper No. 2045.
- [Samuelson, 1947] Samuelson, P. A. (1947). *Foundation of Economic Analysis*. Cambridge, MA, Harvard University Press.
- [Sarker and Itoh, 2001] Sarker, A. and Itoh, T. (2001). Design principles in long-enduring institutions of Japanese irrigation common-pool resources. *Agricultural Water Management*, 48 :89–102.
- [Scheierling et al., 2003] Scheierling, S., Young, R., and Cardon, G. (2003). Price-responsiveness of demand for irrigation water withdrawals vs. consumptive use : estimates and policy implications. Selected paper prepared for presentation at the Western Agricultural Economics Association annual meeting, Denver, Colorado.
- [Scrimgeour, 1997] Scrimgeour, F. (1997). New-Zealand. In Dinar, A. and Subramanian, A., editors, *Water pricing experiences : an international perspective*. World Bank Technical Paper No. 386, Washington D.C.
- [Shani et al., 2004] Shani, U., Tsur, Y., and Zemel, A. (2004). Optimal dynamic irrigation schemes. *Optimal Control Applications and Methods*, 25 :91–106.
- [Shapley and Shubik, 1966] Shapley, L. and Shubik, M. (1966). Quasi-core in a monetary economy with nonconvex preferences. *Econometrica*, 34(4) :805–827.

- [Smets, 2006] Smets, H. (2006). La reconnaissance officielle du droit de l'eau -en France et à l'international. Publication de l'Académie de l'Eau, Nanterre.
- [Starret, 1972] Starret, D. (1972). Fundamental non convexities in the theory of externalities. *Journal of Economic Theory*, 4 :180–199.
- [Tenneson and Rojat, 2003] Tenneson, M. and Rojat, D. (2003). La tarification de l'eau au Maroc : comment servir différentes causes ? *Afrique contemporaine* 205, Agence Française de Développement.
- [Teyssier, 2006] Teyssier, F. (2006). Les consommations d'eau pour irrigation en Midi-Pyrénées. Technical report, Direction Régionale de l'Agriculture et de la Forêt (France).
- [Tietenberg, 2004] Tietenberg, T. (2004). The tradable permits approach to protecting the commons : What have we learned. In *The Drama of the Commons*. National Academy Press, Washington DC.
- [Tsur and Dinar, 1995] Tsur, Y. and Dinar, A. (1995). Efficiency and equity considerations in pricing and allocating irrigation water. World Bank Policy Research Working Paper No. 1460.
- [Tsur and Dinar, 1997] Tsur, Y. and Dinar, A. (1997). On the relative efficiency of alternative methods for pricing irrigation water and their implementation. *World Bank Economic Review*, 11 :243–262.
- [Turrall et al., 2005] Turrall, H., Etechells, T., Malano, H., Wijedasa, H., Taylor, P., McMahon, T., and Austin, N. (2005). Water trading at the margin : the evolution of water markets in the murray darling basin. *Water Resources Research*, 41(7).
- [UNEP, 2007] UNEP (2007). Gestion de la demande en eau, progrès et politiques : Actes du 3^e atelier régional sur l'eau et le développement durable en méditerranée. Technical report, MAP Technical Reports Series No. 168.
- [USCB, 2010] USCB (2010). Midyear population for the world : 1950-2050. Data updated 12-20-2010 source population 2030, U.S. Census Bureau.
- [Wahl, 1989] Wahl, R. (1989). *Markets for federal water : subsidies, property rights, and the Bureau of Reclamation*. Resources for the Future, Washington D.C.
- [World Resources, 1998] World Resources (1998). *A guide to the Global Environment : 1998-1999*. Oxford University Press, New-York.
- [WWF, 2006] WWF (2006). Drought in the Mediterranean : WWF policy proposals. Technical report, World Wide Fund for Nature, Rome.

- [Yaron and Dinar, 1982] Yaron, D. and Dinar, A. (1982). Optimal allocation of farm irrigation water during peak seasons. *American Journal of Agricultural Economics*, 64 :681–689.

Table des figures

2.1	Quasi-concavité du profit dans un espace de distribution continu des stratégies	44
2.2	Méthodologie de couplage	47
2.3	Profit à l'échelle d'une parcelle (année sèche)	54
2.4	Demande à l'échelle d'une parcelle (année sèche)	55
2.5	Profit à l'échelle d'un territoire (année sèche)	61
2.6	Demande à l'échelle d'un territoire (année sèche)	62
3.1	Allocation intra-annuelle pour un quota $\bar{Q} = 100$ (aucune régulation)	80
3.2	Allocation intra-annuelle pour un quota $\bar{Q} = 200$ (aucune régulation)	82
3.3	Allocation intra-annuelle pour un quota $\bar{Q} = 300$ (aucune régulation)	83
3.4	Allocation sans restriction ($\bar{Q} = 200$ mm)	85
3.5	Allocation avec une interdiction d'arrosage aux périodes 4 et 5 ($\bar{Q} = 200$ mm)	85
3.6	Modification de la demande en quota induite par une interdiction de l'irrigation	87
4.1	Timing of the farmer's decisions	98
4.2	Implicit marginal value of water	108
4.3	Intra-annual repartition of available irrigation water (years 2000 and 2002)	109
4.4	Regional land allocation	110
4.5	Allocation of water by type of farmer ($\text{m}^3/\text{farm unit}$)	111
4.6	Water allocation by type of farm (mm/ha)	112
4.7	Impact of a new water allocation rule on water quota for each type of farmer	116
4.8	Impact of a new water allocation rule on the profit for each type of farmer	116
A.1	Caractéristiques climatiques de l'année sèche (1976)	121
A.2	Caractéristiques climatiques de l'année moyenne (1982)	121
A.3	Caractéristiques climatiques de l'année pluvieuse (1988)	121

B.1	Caractéristiques climatiques de l'année sèche (1976)	127
B.2	Caractéristiques climatiques de l'année moyenne (1982)	127
B.3	Caractéristiques climatiques de l'année pluvieuse (1988)	127
B.4	Profit à l'échelle d'une parcelle (année pluvieuse)	131
B.5	Demande à l'échelle d'une parcelle (année pluvieuse)	131
B.6	Profit à l'échelle d'un territoire (année pluvieuse)	134
B.7	Demande à l'échelle d'un territoire (année pluvieuse)	134
B.8	Profit à l'échelle d'une parcelle (année moyenne)	136
B.9	Demande à l'échelle d'une parcelle (année moyenne)	136
B.10	Profit à l'échelle d'un territoire (année moyenne)	139
B.11	Demande à l'échelle d'un territoire (année moyenne)	139
C.1	Allocation intra-annuelle pour un quota $\bar{Q} = 100$ (avec tarification)	159
C.2	Allocation intra-annuelle pour un quota $\bar{Q} = 200$ (avec tarification)	159
C.3	Allocation intra-annuelle pour un quota $\bar{Q} = 300$ (avec tarification)	159
C.4	Allocation avec une interdiction d'arrosage du 2 au 18 juillet ($\bar{Q} = 200$)	163
C.5	Allocation avec une interdiction d'arrosage du 26 juillet au 11 Août ($\bar{Q} = 200$)	163
D.1	Map of the Neste system (France)	168
D.2	Year 2000	170
D.3	Year 2001	171
D.4	Year 2002	171
D.5	Year 2003	173
D.6	Variation of the optimal water quota with respect to the risk neutral case	182
E.1	Impact of a restriction implemented from June 24 to July 10	194
E.2	Impact of a restriction implemented from August 03 to August 19	194
E.3	Quasi-concave profit function in a continuous distribution space of strategies	196
E.4	Baseline case (no restriction)	199
E.5	Irrigation prohibited from June 24 to July 10	199
E.6	Irrigation prohibited from August 03 to August 19	199
E.7	Year 1976 ("dry" scenario)	202

Liste des tableaux

2.1	Périodes d'irrigation	49
2.2	Espace de distribution discret	52
2.3	Espace de distribution continu	57
3.1	Descriptif des phases d'arrêt	79
3.2	Situation de référence (pas de régulation)	81
3.3	Interdictions de l'irrigation avec $\bar{Q} = 200$	84
3.4	Impact d'une restriction sur la valorisation du quota	86
3.5	Valorisation du quota et de la disponibilité de la ressource dans le temps	88
4.1	Region 18 acreage allocation in 2000 (from agricultural census data)	103
4.2	Typology of farmers in the region considered	104
4.3	Corresponding soil ^a to each crop/type of farmer combination	104
4.4	Prices and taxes	105
4.5	Operational charges and agricultural policy	105
4.6	Irrigation costs	105
4.7	Acreage allocation by type of farmer	110
4.8	Water needs are variable depending on years and types (corn crop)	112
4.9	Water needs are variable depending the soil (corn crop)	113
4.10	Impact of the allocation rule on profit	114
A.1.1	Propriétés de l'horizon superficiel	120
A.1.2	Propriétés du profil	120
A.1.3	Caractéristiques de l'hydrodynamique du sol	122
A.3.1	Stades de développement (indice foliaire)	122
A.4.1	Opérations culturales	123

B.1.1	Caractéristiques de l'hydrodynamique du sol	125
B.1.2	Propriétés de l'horizon superficiel	126
B.1.3	Propriétés du profil	126
B.1.4	Stades de développement (indice foliaire)	128
B.1.5	Opérations culturales	128
B.2.1	Profits réalisables à partir d'une culture en sec ou irriguée avec $\bar{Q} = 30$ mm . . .	129
B.2.2	Espace de distribution discret	130
B.2.3	Espace de distribution continu	132
B.2.4	Espace de distribution discret	135
B.2.5	Espace de distribution continu	137
B.2.6	Stratégies utilisées parmi les 407313 à disposition	140
C.1.1	Taxation des prélèvements si $p_t \geq 20$ mm	153
C.3.1	Stratégies utilisées parmi les 9950 à disposition	164
D.3.1	Soils surface horizon properties	169
D.3.2	Full soils profile properties	170
D.3.3	Soils hydrodynamic functioning parameters	172
D.3.4	Development stages (foliar index)	172
D.3.5	Crop management	174
D.4.1	Estimated climate contingent yield functions for selected years and crops (1) . .	176
D.4.2	Estimated climate contingent yield functions for selected years and crops (2) . .	177
D.5.1	Average yields for each crop and each type of farmer	178
D.5.2	Average yields for each crop and each year	178
D.5.3	Average yields for irrigated and non irrigated crops	178
D.5.4	Regional land allocation	179
D.5.5	Impact of the allocation rule on the land allocation	179
D.5.6	Impact of the allocation rule on the regional land allocation	180
D.5.7	Impact of the water allocation rule on the land allocation between irrigated and non-irrigated crops	181
D.6.1	Regional land allocation (-20% of water resources)	181
E.4.1	The simulated restrictions	192
E.5.1	Quota and flow value depending on resource availability in time	192

	225
E.7.1 Baseline case	197
E.7.2 Prohibition from June 24 to July 10	197
E.7.3 Prohibition from August 03 to August 19	198
E.7.4 Examples of Implemented strategies	198
E.7.5 Quota and flow value depending on resource availability in time	200
E.7.6 Soil surface horizon properties	201
E.7.7 Full soil profile properties	201
E.7.8 Soil hydrodynamic functioning parameters	202
E.7.9 Development stages (foliar index)	203
E.7.10 Crop management	203

Résumé

Cette thèse est une contribution à l'analyse de la rareté de l'eau d'usage agricole dans les climats tempérés. Elle propose des modèles d'allocation de la ressource en eau de la parcelle à l'échelle régionale au cours d'une campagne d'irrigation. Les applications empiriques de ces modèles sont basées sur une approche originale consistant dans le couplage de modèles économique et agronomique. La thèse comporte quatre chapitres. Le premier chapitre s'appuie sur l'étude des politiques de l'eau existantes pour illustrer l'état d'une ressource plutôt mal gérée dans le monde et met en évidence la nécessité d'élaborer une doctrine en matière de gestion de l'eau. Le deuxième chapitre présente les conditions sous lesquelles la fonction de demande en eau est identifiable et une méthode permettant de l'évaluer. Il est montré qu'une fonction de demande implicite peut être correctement reconstituée lorsque l'irrigant combine linéairement plusieurs plans d'irrigation sur un périmètre. Les implications économiques sont importantes : lorsque l'irrigation est contrainte par l'équipement, les itinéraires mis en œuvre par le cultivateur ne résultent pas d'un processus d'optimisation d'usage de la ressource. Le troisième chapitre étudie l'impact d'une interdiction temporaire de l'irrigation sur la fonction de demande en eau. On identifie deux phénomènes. D'un côté, un effet de "rationnement" entraîne une dépréciation de la ressource. D'un autre côté, un effet de "gaspillage" accroît le coût d'opportunité d'usage de l'eau. Le dispositif peut induire une consommation annuelle de ressource plus importante qu'en situation non régulée. Le quatrième chapitre considère le problème du partage d'une ressource en eau rare entre des agriculteurs hétérogènes confrontés au risque climatique. Un modèle d'allocation intra-annuelle de l'eau incorporant des choix endogènes d'allocation de la terre entre les cultures permet de calculer la répartition économiquement optimale de la ressource. Une application empirique est développée pour une petite région agricole du sud-ouest de la France. Les résultats montrent que des règles d'allocation de second rang affectent les profits individuels mais ne modifient pas significativement le surplus agrégé.

Mots-clés: irrigation, gestion de l'eau, programmation mathématique, couplage de modèles économique et agronomique, régulations des sécheresses, risque climatique.

Abstract

This thesis contributes to analyse agricultural water scarcity in temperate climate zones. It proposes models of allocation of water resources during the irrigation campaign at the field and the regional scales. Empirical applications follow an original approach consisting in coupling an agronomical model with an economical model. The thesis consists of four chapters. The first chapter leans on a survey of existing water policies to illustrate to which extent that the resource is mismanaged at the global scale and highlights the need for a doctrine in water management. The second chapter provides the satisfying conditions that guarantee the identifiability of the water demand function and gives a convenient method allowing to assess it. We show that identifying an implicit demand function can be properly accomplished when the farmer implements a linear combination of irrigation schedules on the land area. This result has strong economic implications : when irrigation is limited by the equipment, the farmer does not implement irrigation schedules that result from an optimization process of water use. The third chapter considers the impact of a temporary irrigation restriction on farmer's water demand function. We show that two opposite effects can affect water value downward or upward. On one side, a "yield loss" effect leads to a decrease of the value of the resource. On the other side, "a drainage effect" increases its opportunity cost. Therefore, imposing a water limitation at a given period will not necessarily induce a reduction of the yearly water consumption. The last chapter proposes an original framework for sharing a scarce water resource across a heterogeneous population of farmers facing climate uncertainty. An intra-annual water allocation model endogenizing farmer's crop choices and land use decisions gives the allocation of water that maximizes the welfare. An empirical application is developed for an agricultural area located in Southwest of France. Results show that second-best sharing rules does not significantly impact the overall regional surplus but imply water transfers across farmers affecting their individual profit.

Keywords: irrigation, water management, mathematical programming, economic and agronomic models integration, drought regulations, climate risk.

