

Adaptation à court et à long terme de l'agriculture au risque de sécheresse : une approche par couplage de modèles biophysiques et économiques

Arnaud REYNAUD*

* LERNA-INRA, Université Toulouse I de Sciences sociales, 21, allée de Brienne,
31042 Toulouse Cedex, France
e-mail : areynaud@toulouse.inra.fr

Résumé – Dans cet article, nous étudions l'impact d'épisodes de sécheresses sur les décisions et la fonction « objectif » d'un agriculteur. La modélisation utilise un couplage d'un modèle agronomique de croissance de plante (STICS) avec un modèle d'optimisation du comportement des agriculteurs en univers incertain. Sur des données de la région Midi-Pyrénées, nous montrons qu'à court terme le coût induit par la sécheresse peut être élevé. A long terme, c'est-à-dire dans le cas où les systèmes de culture peuvent être modifiés par l'agriculteur, le coût induit de la sécheresse est atténué de manière sensible par ces capacités d'adaptation supplémentaires. Nous montrons ensuite que la mise en place de mécanismes d'alerte sécheresse précoce peut être bénéfique pour les agriculteurs en Midi-Pyrénées.

Mots-clés : changement climatique, risque de sécheresse, agriculture, adaptation

Short and long run adaptation of agriculture to drought risk: Assessment through coupling of economic and biophysical models

Summary – In this article, we analyse the impact of drought risk on agriculture. We use a biophysical crop growth model (STICS) in order to simulate crop yield under various climatic scenarios. A micro-economic model which optimises, under climate uncertainty, land allocation across crops and irrigation is developed to reflect farmer's behaviour. This framework is used to assess the impact of drought risk on a representative French farmer located in the Midi-Pyrénées region (South-West of France). We first show that, on the short run, the private cost of a drought can be high. On the long run, farmers can however significantly reduce this cost by modifying their cropping systems. We finally demonstrate that French farmers may benefit from the implementation of early drought alert mechanisms.

Keywords: climate change, drought risk, agriculture, adaptation

Descripteurs JEL : Q1, D8

1. Introduction

Dans son dernier rapport, le Groupe d'experts inter-gouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC) indique que *le réchauffement du système climatique est sans équivoque car mis en évidence par des observations sur l'augmentation des températures de l'air et des océans, la fonte généralisée des glaciers et une augmentation globale du niveau moyen des mers*», IPCC (2007). Ce rapport précise que l'on doit s'attendre dans le sud de l'Europe à des conditions climatiques plus difficiles (sécheresses, températures plus élevées) et à une baisse de la disponibilité de la ressource en eau¹. Même dans les pays d'Europe du Nord, plus épargnés pour le moment, le processus de changement climatique se traduira par une augmentation de la fréquence des épisodes de sécheresse estivale (European Environmental Agency [EEA], 2007). L'EEA indique de plus que 17 % de la population en Europe a connu un épisode de sécheresse entre 2001-2006 contre 6 % entre 1976 et 1980.

La question n'est donc plus de savoir si l'agriculture va devoir s'adapter à des conditions climatiques différentes de celles que nous connaissons actuellement, mais bien comment elle va pouvoir le faire. Il s'agit d'une question importante car l'agriculture est le secteur économique pour lequel les épisodes de sécheresse se traduisent par les pertes les plus élevées. Le rapport EEA (2007) indique, par exemple, que le coût des sécheresses au Portugal, en 2004 et 2005, a été pour les secteurs de l'industrie, de l'énergie et de l'agriculture respectivement de 32, 261 et 519 millions d'euros. En France, la perte pour le secteur de l'énergie liée à la sécheresse en 2003 est estimée à 300 millions d'euros contre 590 millions pour l'agriculture (EEA, 2007). L'importance de ces coûts justifie pleinement que l'on s'interroge sur les capacités d'adaptation de l'agriculture au changement climatique et, notamment, au risque de sécheresse.

L'analyse des capacités d'adaptation de l'agriculture au risque de sécheresse couvre un champ très vaste de recherches en économie agricole, champ qui va de l'étude des choix d'adoption de technologie d'irrigation², à l'analyse de la couverture des risques de production par des systèmes d'assurance³, en passant par le développement de modèles dynamiques d'optimisation des stratégies d'irrigation de l'agriculteur au cours d'une campagne d'irrigation⁴. On propose dans cet article une analyse des capacités d'adaptation de l'agriculture au risque de sécheresse reposant sur un couplage d'un modèle économique et d'un modèle biophysique de croissance de

¹ Déjà, quatre pays en Europe (Chypre, Malte, Espagne et Italie) sont en situation de stress hydrique, c'est-à-dire qu'ils prélèvent plus de 20 % des ressources en eau disponible à long terme (EEA, 2007).

² Voir, par exemple, Caswell et Zilberman (1985) ou Koundouri *et al.* (2006).

³ Voir, par exemple, Mahul et Wright (2003).

⁴ Les méthodes de programmation dynamique stochastique sont dans ce cas couramment utilisées. Le lecteur intéressé pourra consulter Burt et Stauber (1971), Yaron et Dinar (1982) et Rao *et al.* (1990) comme références essentielles de cette littérature. Une application plus récente de ce type d'approche dans le cas français est Couture (2000).

plante⁵. On utilise le modèle biophysique de manière à simuler le processus de croissance des cultures pour différents itinéraires techniques, notamment différents vecteurs d'apports en eau tout au long de la campagne d'irrigation. Les sorties du modèle agronomique servent alors d'entrée à un modèle économique qui décrit le comportement de maximisation de la fonction « objectif » de l'agriculteur. L'emploi d'un simulateur agronomique permet d'acquérir des données fines sur les relations entre calendriers d'irrigation et niveau physique de la production. Pour étudier l'impact de la sécheresse sur le comportement et la fonction « objectif » de l'agriculteur, il paraît en effet peu approprié de se limiter aux données généralement utilisées par les économistes agricoles qui portent en général sur la relation entre rendement et volume d'eau **total**, mais pas sur les relations entre l'output et la répartition **intra-annuelle** de ce volume⁶. En outre, un simulateur constitue un moyen peu coûteux de générer des données pour différentes conditions météorologiques, toutes choses égales par ailleurs. Il est alors possible d'isoler la variabilité des rendements due au climat et de mettre en lumière le rôle joué par l'irrigation (Flichman et Jacquet, 2003).

Les apports de cet article se situent à deux niveaux. D'abord, en termes méthodologiques, nous montrons comment une approche par couplage de modèles économiques et biophysiques permet d'analyser l'impact du risque climatique sur les décisions des agriculteurs et, ainsi, de mesurer leurs capacités d'adaptation face à ce risque. Par rapport à la littérature existante, nous proposons de distinguer les capacités d'adaptation de court terme (choix de stratégie d'irrigation) et celles de long terme (choix d'assolements). Ensuite, en termes empiriques, ce modèle est appliqué au cas d'un agriculteur représentatif en grandes cultures, situé dans la région Midi-Pyrénées. Nous fournissons alors un certain nombre d'éléments empiriques (mesure de primes de risque, sensibilité des décisions à l'aversion au risque des agriculteurs) susceptibles d'aider à la prise de décisions publiques concernant notamment la mise en place de mécanismes d'alerte sécheresse précoce.

⁵ Le couplage de modèles de croissance de plantes avec des modèles économiques s'inscrit dans une tradition qui remonte au début des années 1990. Cette tradition a été largement initiée aux Etats-Unis par le ministère de l'Agriculture (USDA) qui était alors fortement préoccupé par la mise en place d'une politique efficace de conservation des sols agricoles. Les travaux utilisant des méthodes de couplage ont ensuite porté sur des problèmes de gestion de la pollution diffuse d'origine agricole, voir Mapp *et al.* (1994) et Bouzaher *et al.* (1995). Les approches par couplage de modèles économiques (ou de modèles décisionnels) avec des modèles de croissance de plantes sont maintenant de plus en plus fréquentes dans le contexte agricole. Voir, par exemple, Bergez *et al.* (2001) pour une application spécifique au pilotage de l'irrigation du maïs ou Flichman et Jacquet (2003) pour une présentation plus générale de l'intérêt de ces approches pour l'évaluation des politiques économiques.

⁶ Les stratégies d'esquive en cas de sécheresse nécessitent, par exemple, de connaître la relation entre les apports en eau aux différentes dates d'une campagne d'irrigation et le rendement final. Or, en économie de la production agricole, l'eau est en général considérée comme un facteur agrégé, au même titre que les engrais ou le travail. Just et Pope (2002) ont rappelé que la non-prise en compte de l'hétérogénéité individuelle peut aboutir à des biais importants de spécification des technologies.

Le reste de l'article est organisé de la manière suivante. Dans la section suivante, nous rappelons brièvement la littérature en économie agricole qui traite des capacités d'adaptation de l'agriculture au risque de sécheresse. La section 3 est ensuite consacrée au modèle économique. Dans la section 4, nous présentons une application de ce modèle au cas des grandes cultures en Midi-Pyrénées. La section 5 est consacrée à l'analyse des résultats des simulations économiques, notamment dans le cas d'un risque de sécheresse accru.

2. Adaptation de l'agriculture au risque de sécheresse : une revue de la littérature

Les possibilités d'adaptation de l'agriculture au risque de sécheresse relèvent soit de décisions collectives (réorganisation des filières, transferts d'eau entre régions ou entre usages, nouvelles sources d'approvisionnement en eau, etc.), soit de décisions individuelles (modifications des itinéraires techniques, changements de systèmes de culture, couverture du risque par des systèmes d'assurance, etc.) (voir Amigues *et al.*, 2006)⁷. Dans cet article, nous nous limitons à l'analyse des capacités techniques d'adaptation de l'agriculture au risque de sécheresse *via* des décisions individuelles en distinguant les stratégies de court et de long termes⁸.

2.1. Les capacités d'adaptation à court terme

A court terme (c'est-à-dire à une échelle intra-annuelle), les choix de culture et de technologie d'irrigation ont été faits et seuls les facteurs variables (eau, engrais, pesticides, etc.) peuvent être ajustés en fonction des réalisations du risque climatique ou des anticipations de l'agriculteur. La question qui se pose est alors de déterminer si les facteurs de production variables permettent de limiter l'impact du risque de sécheresse sur la fonction « objectif » de l'agriculteur.

Cette question s'insère d'abord dans un champ beaucoup plus vaste en économie agricole qui vise à déterminer les liens entre niveau des facteurs de production, rendement de la production et variabilité du rendement : voir Just et Pope (1979, 1978) ou Antle (1987). Just et Pope (1979, 1978) ont, par exemple, proposé une fonction de production qui permet de décrire les choix d'intrants en fonction de leur impact différencié sur le rendement espéré et sur la variance de ce dernier. Pour la production de maïs et d'avoine aux Etats-Unis, Just et Pope (1979) concluent que si l'utilisation intensive d'engrais accroît l'espérance de production, elle augmente également significativement la variabilité de ces rendements, ce qui peut se traduire par une baisse du bien-être de l'agriculteur.

⁷ L'adaptation par la voie génétique constitue une autre possibilité. Si les médias se sont fait l'écho de résultats intéressants concernant la survie à la sécheresse, le maintien par amélioration génétique de rendements élevés en condition de stress hydrique n'est pas encore à l'ordre du jour (Itier, 2008).

⁸ Un autre moyen pour un agriculteur de se couvrir contre le risque de sécheresse est d'avoir recours à des systèmes d'assurance publique ou privée. Nous renvoyons à Coble *et al.* (2000) pour une présentation récente des mécanismes d'assurance récolte.

La question de l'adaptation de l'agriculteur au risque climatique *via* des modifications des décisions d'irrigation a souvent été abordée par le biais de modèles de programmation mathématique (programmation dynamique ou programmation dynamique stochastique). L'utilisation de modèles mathématiques dynamiques pour analyser le problème de l'allocation intra-saisonnière de l'eau pour l'irrigation a fait en effet l'objet d'études par les économistes depuis le début des années 1970. Parmi les travaux importants, on peut citer Dudley *et al.* (1971) qui déterminent, en univers risqué, la conduite d'irrigation optimale au cours d'une saison. Yaron et Dinar (1982) analysent l'allocation optimale de l'eau d'irrigation durant des périodes de pointe pour une exploitation qui produit plusieurs cultures. Plus récemment, Rao *et al.* (1990) utilisent un modèle de programmation linéaire et dynamique pour étudier un problème similaire.

En termes de politiques publiques, une question importante qui a émergé de cette littérature sur la conduite optimale de l'irrigation en univers incertain est celle de la mesure de la valeur de l'information pour l'agriculteur, c'est-à-dire du montant monétaire que serait prêt à payer l'agriculteur pour disposer d'une information corrélée avec le risque auquel il fait face⁹. Bosch et Eidman (1987), par exemple, ont déterminé le montant que serait prêt à payer un agriculteur pour obtenir une information plus précise sur la réserve utile, la croissance de la plante et le climat. Ils montrent que la valeur de l'information est d'autant plus élevée que l'eau pour l'irrigation est limitée et que la capacité de rétention de l'eau par le sol est faible. Ils montrent aussi que le montant que l'agriculteur est prêt à payer pour obtenir une meilleure information dépend de son attitude face au risque et augmente substantiellement si la ressource en eau est limitée.

2.2. Les capacités d'adaptation à long terme

A long terme (c'est-à-dire à une échelle pluriannuelle), à la fois les technologies d'irrigation et les choix de systèmes de culture peuvent être modifiés par l'agriculteur de manière à atténuer l'impact de la réalisation des sécheresses.

2.2.1. Changement de technologie d'irrigation

Les effets de l'incertitude climatique sur les choix d'adoption de technologie d'irrigation ont fait l'objet de nombreuses études en économie agricole : voir Caswell et Zilberman (1985), Schaible *et al.* (1991) ou encore Koundouri *et al.* (2006). Zilberman *et al.* (2003) indiquent par exemple qu'à la suite de cinq années de sécheresse entre 1987 et 1991, la Californie s'est engagée dans un processus d'intensification du recours à des technologies d'irrigation performantes. Ainsi, l'irrigation par goutte à goutte a augmenté de 40 % pour les fruits et la culture des légumes sur cette période. Sur des données historiques plus longues, Zilberman *et al.* (2003) retrouvent encore ce phénomène. Ils indiquent en effet que l'irrigation n'a en fait réellement progressé en

⁹ Une mesure de la valeur de l'information constitue en effet un élément important pour conduire une analyse coût/bénéfice de la mise en place de systèmes d'alerte sécheresse précoce.

Californie qu'après la sécheresse de 1976. Ainsi le recours à l'irrigation et le changement de technologie d'irrigation constituent deux facteurs essentiels d'adaptation de l'agriculture au risque de sécheresse.

2.2.2. *Changement de systèmes de culture*

Un moyen à long terme d'atténuer les impacts de la sécheresse consiste à modifier les systèmes de culture, c'est-à-dire les assolements et les rotations culturales, au profit de variétés plus résistantes au stress hydrique. Selon Amigues *et al.* (2006), la substitution du maïs irrigué par du sorgho irrigué permet une économie d'au moins 50 % des volumes d'eau. Ces résultats obtenus en France en conditions expérimentales posent des problèmes de faisabilité à grande échelle (adaptation des filières, baisse des marges) qui n'ont que peu été étudiés pour le moment, en tout cas dans le contexte français. Plus généralement, il faut mentionner que les changements de systèmes de culture constituent un des facteurs d'adaptation de l'agriculture au changement climatique mis en exergue par le GIEC (voir, par exemple, IPCC, 2007).

3. Le modèle économique d'optimisation du comportement de l'agriculteur

Dans cette section, nous décrivons de manière formelle le comportement d'optimisation de l'agriculteur en univers incertain.

3.1. Modélisation des décisions de l'agriculteur à court et à long termes

Considérons un agriculteur représentatif d'une zone géographique et d'un contexte pédoclimatique donnés faisant face à un aléa qui représente les conditions climatiques. Pour gérer au mieux les réalisations possibles de ces aléas climatiques, l'agriculteur peut prendre deux types de décisions. **A court terme**, c'est-à-dire à l'échelle intra-annuelle, les assolements sont fixés¹⁰ et les seules variables d'ajustement dont il dispose sont les stratégies d'irrigation à associer à chaque culture. **A long terme**, les assolements, c'est-à-dire ici les parts de surface agricole utile (SAU) attribuées à chaque système de culture, peuvent être également modifiés par l'agriculteur. L'hypothèse sous-jacente est que ces choix de systèmes de culture sont effectués une fois pour toutes par l'agriculteur et qu'ils ne peuvent pas être optimisés en fonction de la réalisation de l'aléa climatique.

Le problème de l'agriculteur représentatif consiste donc à allouer sa surface agricole utile entre différents systèmes de culture possibles, tout en optimisant le choix des stratégies d'irrigation en fonction des réalisations de l'aléa climatique. Dans ce qui suit, nous présentons son programme d'optimisation en faisant la distinction entre ses choix de court terme (stratégie d'irrigation) et ses choix de long terme (part de surface à allouer aux différents systèmes de culture).

¹⁰ On fait l'hypothèse que le choix de systèmes de culture (c'est-à-dire de part de SAU à allouer à chaque culture) est un choix de long terme qui ne peut pas être modifié chaque année. Cela paraît raisonnable, par exemple, pour le maïs irrigué qui peut nécessiter des équipements en irrigation importants.

3.2. Le choix de court terme (intra-annuel) des stratégies d'irrigation

On considère une campagne agricole qui se déroule à un pas de temps journalier indicé par t , $t \in \{1, \dots, T\}$. On suppose dans un premier temps que l'agriculteur a alloué une part $\delta^k \in [0, 1]$ de sa SAU au système de cultures k , $k \in \{1, \dots, K\}$, avec $\sum_{k=1}^K \delta^k = 1$. La question est de déterminer pour chaque système de culture, les stratégies d'irrigation qui devront être utilisées en fonction de la réalisation de l'aléa climatique. Nous définissons de manière formelle une stratégie d'irrigation de la manière suivante.

Définition : Une stratégie d'irrigation est un vecteur \mathbb{R}_+^T d'apports journaliers en eau tout au long de la campagne agricole.

On décide d'indicer les stratégies d'irrigation par s , $s \in \{1, \dots, S\}$ où S représente le nombre de stratégies d'irrigation possibles. La quantité d'eau apportée au système de culture k le jour t si l'agriculteur opte pour la stratégie d'irrigation s est notée $WAT_{ks,t}$. La quantité totale d'eau apportée au système de culture k pendant la campagne d'irrigation si l'agriculteur opte pour la stratégie d'irrigation s est notée WAT_{ks} avec $WAT_{ks} = \sum_t WAT_{ks,t}$.

Il est clair qu'un stress hydrique au début de la campagne n'aura pas le même effet sur le rendement final qu'un stress hydrique de même intensité en fin de campagne. Cela traduit le fait qu'un modèle dynamique de croissance de la plante est nécessaire pour correctement appréhender les décisions intra-annuelles d'irrigation de l'agriculteur. Appelons $\bar{Y}_{ks,t}$ le rendement au jour t associé au système de culture k si la stratégie d'irrigation s est appliquée et notons \bar{Y}_k le rendement en début de campagne (condition initiale). La dynamique journalière de croissance du rendement est alors donnée par l'équation suivante :

$$\bar{Y}_{ks,t+1} = \phi_t(\bar{Y}_{ks,t}, \tilde{\epsilon}_t, WAT_{ks,t}) \quad (1)$$

qui traduit le fait que le rendement le jour $t+1$ est une fonction, ϕ_t ¹¹, de $\bar{Y}_{ks,t}$, c'est-à-dire du rendement en t , de $\tilde{\epsilon}_t$, c'est-à-dire de la réalisation de l'aléa climatique en t et de $WAT_{ks,t}$, c'est-à-dire de la quantité d'eau apportée par l'irrigation ce même jour. Ce faisant, on fait implicitement l'hypothèse que la croissance du rendement suit un processus markovien de premier ordre¹². L'agriculteur s'intéresse au rendement final, c'est-à-dire au rendement au dernier jour de la campagne donné par $\bar{Y}_{ks,T}$.

¹¹ Faire dépendre la fonction ϕ du temps traduit le fait que l'impact de l'aléa climatique ou de l'irrigation sur l'évolution du rendement n'est pas le même à tous les stades de croissance de la culture considérée. Autrement dit, le modèle tient compte du fait qu'il peut être profitable pour l'agriculteur de rationner en eau des cultures à certaines dates pour lesquelles l'impact sur le rendement final est limité, mais pas à d'autres.

¹² On fait l'hypothèse que la seule variable de décision journalière de l'agriculteur est la quantité d'eau d'irrigation. Les autres décisions habituellement prises par l'agriculteur (date de semis, date et niveau des apports en engrais, date et niveau des apports en pesticides, etc.) sont modélisées sous la forme d'itinéraires techniques fixes indépendants de l'aléa climatique.

On peut alors écrire le programme dynamique d'optimisation intra-annuelle de l'agriculteur. Notons α_{ks} avec $k \in \{1, \dots, K\}$ et $s \in \{1, \dots, S\}$, la part de SAU allouée par l'agriculteur au système de cultures k et sur laquelle est appliquée la stratégie d'irrigation s . Par définition, la contrainte

$$\sum_{s=1}^S \alpha_{ks} = \delta_k \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (2)$$

doit tenir. A court terme, le problème dynamique intra-annuel de l'agriculteur représentatif, noté P_1 , s'écrit :

$$\underset{\{\alpha_{k1}, \dots, \alpha_{ks}, \dots, \alpha_{kS}\}_{k=1, \dots, K}}{\text{Max}} \quad U \left(SAU \cdot \sum_{k,s} \alpha_{ks} \cdot [p_k \cdot \bar{Y}_{ks,T} + PAC_k - C_k - w \cdot WAT_{ks}] \right) \quad (3)$$

$$\text{s.l.c.} \quad \bar{Y}_{ks,t+1} = \phi_t(\bar{Y}_{ks,t}, \tilde{\epsilon}_t, WAT_{ks,t}) \quad t=1, \dots, T-1 \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (4)$$

$$\bar{Y}_{ks,1} = \bar{Y}_k \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (5)$$

$$\sum_{s=1}^S \alpha_{ks} = \delta_k \quad \forall k \in \{1, \dots, K\} \quad (6)$$

où :

- U représente la fonction d'utilité de l'agriculteur avec $U'(\cdot) > 0$, $U''(\cdot) < 0$ et $U(\cdot)$ supposée continûment 2 fois différentiable ;
- SAU représente la surface agricole utile totale (en ha) ;
- p_k représente le prix unitaire associé au système de culture k (en euros/kg) ;
- $\bar{Y}_{ks,T}$ représente le rendement en fin de campagne associé au système de culture k pour lequel la stratégie d'irrigation s est appliquée (en kg). Ce rendement dépend de la réalisation de l'aléa climatique $\tilde{\epsilon} = (\tilde{\epsilon}_1, \dots, \tilde{\epsilon}_T)$;
- PAC_k représente le montant par ha de la prime compensatoire associée au système de culture k (en euros/ha) ;
- C_k représente le coût de production par hectare (hors dépenses en eau) associé au système de culture k (en euros/ha) ;
- w représente le prix unitaire de l'eau (en euros/mm/ha).

Autrement dit, à court terme, le problème de l'agriculteur consiste à choisir, étant données les réalisations journalières de l'aléa climatique pour chaque système de culture, la part de SAU à affecter à chaque stratégie d'irrigation possible de manière à maximiser l'utilité de son profit. Dans la fonction « objectif » du programme P_1 , le terme en crochets correspond à la marge brute par ha du système de culture k sur lequel est appliquée la stratégie d'irrigation s . La marge brute s'écrit comme la différence entre la recette (prix de la culture k multiplié par le rendement correspondant à la stratégie d'irrigation s , augmenté des primes compensatoires) et les

coûts de production (coût variable de production plus dépenses spécifiques en eau qui dépendent de la stratégie d'irrigation).

On doit, à ce stade, souligner plusieurs hypothèses sous-jacentes à l'écriture de ce programme. Premièrement, l'agriculteur connaît parfaitement sa fonction de production et donc est à même de calculer pour chaque stratégie d'irrigation le rendement de chaque culture. Ensuite, nous faisons l'hypothèse que l'agriculteur observe la réalisation de l'aléa climatique lorsqu'il choisit ses stratégies d'irrigation à court terme. Cela correspond à une hypothèse d'anticipation rationnelle de la part de l'agriculteur. Cette hypothèse sera levée dans la partie empirique de cet article où l'on considérera le cas d'une observation partielle de l'aléa climatique. Enfin, dans le programme P_1 , l'agriculteur peut utiliser n'importe quelle stratégie faisant partie de l'ensemble des possibles. En pratique, il se peut que l'agriculteur soit contraint dans ses choix d'irrigation. Le type de contraintes que l'on va modéliser dans ce qui suit inclut typiquement des quotas maximum d'irrigation (en mm/ha), des interdictions ou des limitations d'irrigation à certaines périodes de l'année dans le cas de sécheresse.

3.3. Le choix de long terme (interannuel) des systèmes de culture

La solution du problème d'optimisation P_1 permet de déterminer les parts optimales de SAU de chaque système de culture à allouer à chaque stratégie d'irrigation. On note :

$$\hat{U}(\tilde{\epsilon}, \delta_1, \dots, \delta_k, \dots, \delta_K) \quad (7)$$

la solution du programme P_1 , c'est-à-dire l'utilité optimisée à court terme de l'agriculteur sachant que l'aléa climatique réalisé est $\tilde{\epsilon}$ et qu'une proportion $\delta_k \in [0, 1]$ de SAU a été allouée au système de culture k , $k = 1, \dots, K$.

Etant donnée l'utilité de l'agriculteur optimisée à court terme, il s'agit maintenant de déterminer la part optimale de SAU qui devrait être allouée à chaque système de culture. A long terme, l'agriculteur représentatif n'observe pas la réalisation de l'aléa climatique, mais il connaît sa fonction de densité, $f(\cdot)$, et sa fonction de répartition, $F(\cdot)$ ¹³. Le programme d'optimisation de l'agriculteur P_2 s'écrit alors :

$$\begin{aligned} & \underset{\{\delta_1, \dots, \delta_k, \dots, \delta_K\}}{\text{Max}} \{E\hat{U}(\tilde{\epsilon}, \delta_1, \dots, \delta_k, \dots, \delta_K) - \sum_k \delta_k \cdot \lambda_k\} \\ & \text{s.l.c} \quad \sum_k \delta_k = 1 \end{aligned} \quad (8)$$

où E est l'opérateur espérance pris par rapport à la distribution de l'aléa anticipée par l'agriculteur représentatif. Dans le programme précédent, le terme λ_k représente un coût spécifique à chaque système de culture, mesuré en unité d'espérance d'utilité. On peut interpréter ce terme comme l'ensemble des coûts non observés (dépenses d'amortissement, contraintes techniques non modélisées, etc.) qui font que l'agriculteur

¹³ On suppose que l'agriculteur est capable de former un *a priori* unique sur la distribution de l'aléa. Cet *a priori* unique peut provenir de l'observation passée des aléas. Le modèle s'inscrit donc dans un cadre d'espérance d'utilité en excluant la possibilité d'aversion à l'ambiguïté.

ne choisit pas nécessairement d'allouer toute sa SAU au système de culture qui lui procure une espérance d'utilité du profit la plus élevée. Nous reviendrons sur la définition de ces coûts dans la section suivante.

4. Une application au cas des grandes cultures en Midi-Pyrénées

4.1. Spécification du modèle empirique

4.1.1. Caractérisation des systèmes de cultures possibles

Nous avons limité le nombre de systèmes de culture pouvant être utilisés par l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées à 3. Le système A correspond à une monoculture maïs, B à une rotation « blé dur – blé dur – sorgho », et le système C à une rotation « blé dur – tournesol »¹⁴. Ainsi, à long terme, le problème d'optimisation de l'agriculteur consiste à déterminer quelle proportion de sa surface agricole utile doit être allouée à chacun des 3 systèmes de culture, de manière à maximiser l'espérance d'utilité de son profit. En utilisant les notations des programmes P_1 et P_2 , on a donc $k \in \{A, B, C\}$.

4.1.2. Caractérisation des stratégies d'irrigation possibles

Pour les cultures associées à chaque système de cultures, l'agriculteur peut opter pour une ou plusieurs stratégies d'irrigation. Dans ce qui suit, on limite le nombre de dates d'apports en eau au cours d'une campagne à 12. Ainsi, l'agriculteur a le choix entre 12 dates réparties de manière uniforme tout au long de sa campagne d'irrigation, dates auxquelles il peut décider d'apporter ou non à chaque culture une dose d'eau prédéfinie. Pour le système de culture A, nous considérons à chacune des 12 dates possibles une dose de 30 mm par hectare avec un cumul maximum de 300 mm par hectare sur l'ensemble de la saison d'irrigation. On note $WAT_{A,s} \in \mathbb{R}^T$ la s -ième stratégie du système de culture A. Par définition, l'ensemble des stratégies possibles est défini par :

$$WAT_{A,st} \in \{0, 30\} \text{ et } \sum_{t=1}^T WAT_{A,s,t} \leq 300 \quad (9)$$

Le cardinal de l'ensemble de stratégies pour le système de culture A est 4083. Le système de culture B correspond à une irrigation de complément. On considère ici encore 12 dates possibles auxquelles l'agriculteur peut apporter 30 mm d'eau par

¹⁴ Le choix des systèmes de culture représentatifs en Midi-Pyrénées a été effectué avec l'aide d'experts régionaux dans le cadre de l'expertise collective sécheresse, voir Amigues *et al.* (2006) et Brisson *et al.* (2006). Le système A est le plus consommateur en eau, à base de cultures entièrement irriguées. A l'opposé, le système C est le plus économe avec des cultures conduites sans irrigation (appelées aussi cultures pluviales). En position intermédiaire le système B utilise l'irrigation d'appoint, qui ne couvre qu'une partie des besoins en eau des plantes.

hectare. On limite cependant le total des apports sur l'ensemble de la saison d'irrigation à 120 mm par ha. Par définition, l'ensemble des stratégies possibles est défini par :

$$WAT_{Bst} \in \{0,30\} \text{ et } \sum_{t=1}^T WAT_{Bst} \leq 120 \quad (10)$$

Le nombre de stratégies d'irrigation considérées pour le système de culture B est donc 794. Enfin, le système de culture C correspond à des cultures en sec (blé dur et tournesol). Il n'y a donc pas de stratégie d'irrigation associée à cette culture.

4.1.3. La représentation du climat

Dans le programme de court terme, P_1 , l'agriculteur choisit ses stratégies d'irrigation en ayant observé (au moins partiellement) la réalisation de l'aléa climatique au cours de la campagne agricole. On a noté $\tilde{\epsilon}_t$ la réalisation de cet aléa climatique au jour t où $t \in \{1, \dots, T\}$. Il convient maintenant de préciser la nature de cet aléa. L'aléa climatique représente l'ensemble des variables climatiques qui vont avoir un impact sur le processus de croissance des différentes cultures, processus modélisé par le modèle biophysique STICS¹⁵. Dans ce modèle, les variables climatiques qui ont une influence sur la croissance journalière des cultures sont les températures minimales et maximales journalières, le rayonnement journalier, l'ETP Penman journalier et la pluie (voir annexe A). Ainsi, pour le jour t , l'aléa climatique $\tilde{\epsilon}_t$ est un vecteur 5×1 constitué de ces cinq variables. L'agriculteur choisit alors les stratégies d'irrigation qu'il va utiliser pour chaque système de culture en anticipant de manière rationnelle (au moins partiellement) ces cinq variables pour l'ensemble de la campagne agricole.

Dans le programme de long terme, P_2 , l'agriculteur choisit les parts de SAU qu'il va allouer à chaque système de cultures en se basant sur une distribution de l'aléa climatique en maximisant l'espérance d'utilité de son profit. Autrement dit, l'agriculteur connaît la distribution de probabilité qui caractérise l'aléa climatique et il prend des décisions optimales en conséquence. Il convient alors de caractériser comment est construite cette distribution. Nous disposons de 33 années d'historique du climat (de 1972 à 2005) pour lesquelles on observe les réalisations des variables climatiques à un pas de temps journalier. On considère alors que chaque année climatique observée est équiprobable et l'on affecte donc à chacune d'elle, dans la fonction « objectif » à long terme du programme P_2 , une probabilité égale à $1/33$. Une hypothèse implicite est que la distribution du climat est « stationnaire » dans le temps et donc que les réalisations passées peuvent être utilisées pour caractériser le climat présent¹⁶.

¹⁵ Voir Brisson *et al.* (2002) pour une présentation du modèle STICS ou Brisson *et al.* (2006) pour une utilisation récente sur trois régions françaises.

¹⁶ Cette hypothèse est levée dans la section 4, où l'on étudie l'impact d'une augmentation de la fréquence des années de sécheresse sur la fonction « objectif » et sur les décisions des agriculteurs.

4.1.4. La fonction de production

On a supposé que l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées est en mesure de calculer, pour chaque décision possible (système de culture et stratégie d'irrigation), la valeur de sa fonction « objectif » de manière à pouvoir prendre des décisions optimales. Le modèle d'optimisation du comportement de l'agriculteur doit donc être en mesure de représenter ces différents choix. Pour cela, nous avons utilisé la version STICS-C du modèle de croissance de plante STICS (voir Poupa, 2006). Cette version permet d'associer à chaque vecteur d'irrigation possible le rendement de la culture considérée (nous avons retenu comme variable de rendement la « matière sèche des organes récoltés à 0 % d'humidité », directement fournie en sortie de STICS). Les principales valeurs utilisées pour paramétrer le modèle biophysique STICS sont présentées en annexe A. Les résultats des simulations biophysiques étant fortement dépendants de la nature des sols, nous avons retenu trois sols différents sur lesquels seront conduits des exercices de statique comparative¹⁷.

4.1.5. Paramétrage du modèle économique

Le modèle a été paramétré en utilisant les données de prix, de coût et de primes compensatoires à partir des fiches production du modèle SICOMORE, développé par la chambre d'Agriculture de Midi-Pyrénées (CRA-MP). Le modèle économique a été calibré sur l'année 2000-2001. Ce choix résulte de deux principales contraintes. D'abord, il s'agit de la dernière année pour laquelle il est possible de connaître, via les données du modèle SICOMORE, les coûts unitaires de production par culture pour différents sols de la région Midi-Pyrénées. Ensuite, il est préférable de calibrer le modèle sur une année « moyenne » plutôt que sur une année sèche¹⁸.

La SAU moyenne en Midi-Pyrénées est de 40 hectares en grandes cultures (source Agreste). A partir de l'observation des surfaces régionales allouées aux différentes cultures en 2000-01 (maïs, blé dur, sorgho et tournesol, source CRA-MP), nous avons calculé la part de surface allouée aux systèmes de culture A, B et C, en 2000-01¹⁹. On obtient, pour l'année 2000-01 et pour le système de culture A (monoculture maïs), 46,0 % de la SAU ; pour le système de culture B (blé dur – blé dur – sorgho), 19,1 % ; et pour le système de culture C (blé dur – tournesol), 34,9 %.

Dans le tableau 1, nous présentons les données économiques qui ont servi au calibrage du modèle d'optimisation de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées sur l'année 2000-2001. Il convient de relever que les données de coût de production par

¹⁷ Il s'agit d'un sol à faible réserve utile (entre 40 et 100 mm), d'un sol à forte réserve utile (supérieure à 160 mm) et d'un sol intermédiaire (réserve utile entre 100 et 160 mm).

¹⁸ Se faisant, on se place dans un contexte de mesures PAC avant la réforme 2003.

¹⁹ Nous ne disposons au niveau de la région Midi-Pyrénées que des données de surface par culture et non des surfaces allouées à chaque système de culture. Une manière de procéder pour retrouver cette information pourrait être d'estimer un processus de Markov à partir des données de surfaces régionales et d'en déduire les proportions de surface attribuées à chaque système de culture (voir Howitt et Reynaud, 2003, par exemple). Nous avons opté pour une méthode beaucoup plus simple qui consiste à additionner les surfaces observées en 2000/2001 pour le maïs grain, le blé dur et le tournesol. La proportion de maïs correspond à la proportion du système de culture A, celle de blé dur au système B et celle de tournesol au système C.

4.1.6. La spécification de la fonction d'utilité de l'agriculteur

Les agriculteurs ne connaissent pas de manière parfaite la situation dans laquelle ils effectuent leurs choix de long terme. Cette connaissance imparfaite du futur confère au profit un caractère incertain. Les attitudes des agriculteurs sont en général représentées par leurs préférences et donc par leur fonction d'utilité. Nous avons retenu une fonction d'utilité avec aversion relative pour le risque constante (utilité CRRA), car d'une part, c'est une forme fonctionnelle très couramment utilisée en économie agricole (voir, par exemple, Bontems et Thomas, 2006) et, d'autre part, c'est une forme dont les paramètres s'interprètent très aisément²¹. L'utilité que retire l'agriculteur d'un profit Π s'écrit :

$$U(\Pi) = \frac{1}{1-\alpha} \Pi^{1-\alpha} \quad (11)$$

où α est le coefficient relatif d'aversion au risque de l'agriculteur (coefficient d'Arrow-Pratt). Ce coefficient traduit les préférences de l'agriculteur pour un lissage de ses revenus agricoles dans le temps ou entre les différents états de la nature possibles.

Le paramétrage du coefficient relatif d'aversion au risque de l'agriculteur est important dans la mesure où l'on sait que les résultats dépendent des préférences de l'agriculteur vis-à-vis du risque. Cependant, il n'existe pas à notre connaissance de travaux publiés sur l'estimation de l'aversion au risque des agriculteurs en France faisant intervenir l'irrigation. Les travaux les plus proches sont soit sur le cas français, mais n'incluent pas l'eau d'irrigation dans la liste des intrants (Bontems et Thomas, 2006), soit sur des pays étrangers (Belhaj Hassine et Thomas, 2001 ; Chavas et Holt, 1990 ; Chavas et Holt, 1996, Groom *et al.*, 2008). Par exemple, Belhaj Hassine et Thomas (2001), pour des irrigants tunisiens, estiment un coefficient d'Arrow-Pratt égal à 0,314 ce qui correspond à un agriculteur légèrement averse au risque au sens de Holt et Laury (2002). Groom *et al.* (2008) considèrent le modèle d'Antle sur des données chypriotes et des intrants incluant l'eau et les engrais. Ces auteurs trouvent un coefficient d'Arrow-Pratt égal à 0,340 et 0,072 pour les céréaliers et les horticulteurs respectivement. En référence à cette littérature, nous avons choisi pour l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées un coefficient d'aversion au risque égal à 0,2 ce qui correspond à un agriculteur légèrement averse au risque. Des exercices de statique comparative seront conduits de manière à tester la stabilité des résultats à ce choix.

4.2. Les résultats du modèle économique

4.2.1. Système de cultures et marge brute

Nous présentons, dans le tableau 2, le résultat des simulations économiques pour les trois sols représentatifs de Midi-Pyrénées. On se limite dans un premier temps à une discussion sur le niveau des marges brutes (même s'il est nécessaire ici de rappeler que

²¹ De plus la fonction d'utilité CRRA implique une aversion absolue au risque décroissante, propriété souvent observée en économie agricole (Chavas et Holt, 1996).

Tableau 2. Marge brute et irrigation optimisées dans le cadre standard

		1972-2005			Années sèches ^a		
Systèmes de culture		A	B	C	A	B	C
Sol 1	Marge brute (euros/ha)	472,3	669,5	595,3	436,7	612,5	532,5
					-7,5 %	-8,5 %	-10,6 %
Sol 1	Irrigation (mm/ha)	134,6	10,3	-	210	12	-
					+56,0 %	+16,5 %	-
Sol 2	Marge brute (euros/ha)	917,4	725,3	746,7	628,6	725,8	664,48
					-31,5 %	+0,1 %	-11,0 %
Sol 2	Irrigation (mm/ha)	157,7	12	-	246	12	-
					+56,0 %	+0,0 %	-
Sol 3	Marge brute (euros/ha)	932,0	742,1	778,1	718,1	702,5	675,8
					-23,0 %	-5,3 %	-13,1 %
Sol 3	Irrigation (mm/ha)	145,7	10,3	-	282	10	-
					+93,5 %	-2,9 %	-

Notes : ^a : Les années sèches correspondent aux années 1976, 1989, 1990, 2003 et 2005.

La marge brute et l'irrigation correspondent à des moyennes annuelles calculées sur l'ensemble des années pour la colonne 1972-2005 et sur les années sèches pour la colonne Année sèches.

Les pourcentages correspondent à la variation par rapport à la colonne 1972-2005. Par exemple, la marge brute moyenne pour une année sèche du système de culture A et un sol de type 1 est 7,5 % plus faible que la marge brute moyenne calculée sur l'ensemble des périodes.

l'agriculteur représentatif averse au risque ne cherche pas à maximiser sa marge brute, mais l'utilité qu'il retire de cette marge brute) et sur celui de l'irrigation optimale.

Tout d'abord, le type de sol a un impact très important sur la marge brute associée à chaque système de culture. C'est vrai en particulier pour le système de culture A (monoculture maïs) dont la marge brute passe en moyenne, sur l'ensemble des années 1972-2005, de 932 euros par ha avec un sol de type 3 (sol profond avec forte réserve utile) à 472,3 euros par ha dans le cas d'un sol 1 (sol peu profond avec faible réserve utile). On peut relever cependant des résultats (en termes de marge brute et de niveau optimal d'irrigation) relativement proches pour les sols de type 2 et 3. Notons également que, dans le cas d'un sol de type 1, c'est le système de culture B (blé dur – blé dur – sorgho) qui permet d'obtenir la marge brute moyenne la plus élevée sur les années 1972-2005, alors qu'en cas de sol de type 2 ou 3 (sol moyennement profond et réserve utile intermédiaire et sol profond et réserve utile élevée), c'est le système de culture A (monoculture maïs) qui est préféré selon le même critère.

Intéressons-nous maintenant à l'impact des années sèches sur la marge brute de l'agriculteur représentatif de la région Midi-Pyrénées et sur ses décisions optimales d'irrigation. En termes de variation de la marge brute par rapport à la moyenne 1972-2005, c'est le système de culture A (monoculture maïs) qui enregistre les plus

forts changements suite aux années sèches : $-7,5\%$ dans le cas d'un sol de type 1 ; $-31,5\%$ dans le cas d'un sol de type 2 et $-23,0\%$ pour un sol de type 3. L'impact des années sèches sur la marge brute moyenne dans le cas d'un système de culture C (blé dur – tournesol) semble relativement indépendant du type de sol. La perte moyenne de marge brute varie de $-13,1\%$ pour un sol de type 3 à $-10,6\%$ pour un sol de type 1. Le système de culture B semble légèrement profiter des années sèches dans le cas d'un sol de type 2. Pour les sols de type 1 et 3, la perte en marge brute lors des années de sécheresse représente respectivement $8,5\%$ et $5,3\%$.

En termes d'impact des sécheresses sur les niveaux d'irrigation optimaux, c'est encore le système de culture A qui paraît le plus sensible. Par exemple, sur l'ensemble des années 1972-2005, l'irrigation optimale moyenne est de $145,7\text{ mm/ha}$ pour le système de culture A pour le sol de type 3. Dans le cas d'années sèches, on relève une augmentation de $93,5\%$ et l'irrigation optimale moyenne passe à 282 mm/ha . Il convient de relever que l'augmentation du niveau optimal d'irrigation dépend, bien entendu, du prix de l'eau payé par l'agriculteur. Si l'on augmente de 50% le prix de l'eau au mètre cube par rapport au cas de base (le prix de l'eau passant de $0,064$ à $0,128$ euros par mètre cube), l'irrigation optimale moyenne en cas de sécheresse passe à 210 mm/ha contre 282 mm/ha précédemment ($-25,5\%$ en volume). Cela traduit le fait que, même dans un système de monoculture maïs, les agriculteurs sont sensibles à des variations du coût de l'eau, variation, il est vrai, importante ici puisqu'elle représente une augmentation de 50% des dépenses opérationnelles en eau.

Pour conclure, sur les résultats du tableau 2, l'impact des années sèches sur la marge brute optimisée et sur les décisions d'irrigation de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées semble : important dans le cas d'un système de culture A (monoculture maïs) – perte de marge brute de $20,7\%$ en moyenne pour les trois sols ; très modéré dans le cas d'un système de culture B – perte de marge brute de $4,6\%$ en moyenne pour les trois sols ; et relativement important dans le cas d'un système de culture C – perte de marge brute de $11,6\%$ en moyenne pour les trois sols. Ces résultats soulignent que les limitations d'irrigation déterminent de manière fondamentale l'impact des sécheresses sur la marge brute de l'agriculteur. En effet, pour le sol de type 3 et sur l'ensemble des années 1972-2005, l'irrigation optimale moyenne est de $145,7\text{ mm/ha}$ pour le système de culture A. Par contre, dans le cas d'années sèches, on relève une augmentation de $93,5\%$ et l'irrigation optimale moyenne passe à 282 mm/ha , une valeur très proche de la limite 300 mm/ha ²². Il est donc vraisemblable que, lors de certaines années sèches, l'agriculteur vient heurter cette contrainte de 300 mm/ha ²³. Cela signifie que la perte de marge brute du système de culture A en cas de sécheresse résulte de deux effets conjoints : des conditions climatiques vraisemblablement particulières, mais aussi une contrainte

²² Nous rappelons que nous avons limité les stratégies d'irrigations possibles pour le système de culture A à celles dont le cumul annuel est inférieur à 300 mm/ha (valeur déjà largement supérieure à la moyenne régionale).

²³ Sur les cinq années sèches que nous considérons (1976, 1989, 1990, 2003 et 2005), la contrainte de 300 mm/ha est en fait saturée pour deux années (1990 et 2005). Pour les trois années restantes, l'irrigation optimale est de 270 mm/ha .

exprimée en terme de niveau d'irrigation. Pour aller plus loin, il est probable que si l'on supprimait toute contrainte de niveau d'irrigation maximum, l'impact de la sécheresse sur les systèmes de culture A et C serait bien moindre et les niveaux optimaux d'irrigation beaucoup plus élevés.

4.2.2. Assurance du risque de sécheresse et primes de risque

Une question posée par le problème de la sécheresse, à la fois aux pouvoirs publics, aux assurances privées et aux agriculteurs eux-mêmes, est celle de l'assurabilité d'un tel risque. Dans ce paragraphe, on se propose de quantifier l'équivalent certain et la prime de risque de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées, deux éléments importants pour la mise en place éventuelle d'assurance sécheresse.

Pour une présentation plus complète des concepts d'**équivalent certain** et de **prime de risque** (ainsi que de leur calcul dans le modèle empirique), le lecteur intéressé pourra se reporter à l'annexe B. On rappelle ici seulement que le profit réalisé par l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées est stochastique du fait de la présence de l'aléa climatique. L'équivalent certain de cette activité agricole stochastique correspond alors au niveau certain de richesse (en euros) qui procure à l'agriculteur un niveau d'espérance d'utilité égal à celui de l'activité agricole soumise à l'aléa. En d'autres termes, l'agriculteur est indifférent entre recevoir l'équivalent certain de manière sûre et exercer son activité agricole risquée. La prime de risque est alors définie comme le montant monétaire que l'agriculteur est prêt à sacrifier pour éviter toute forme de risque dans l'exercice de son activité agricole. Autrement dit, la prime de risque est le montant monétaire que l'agriculteur est prêt à payer pour recevoir le niveau de profit espéré tout en conservant un niveau d'espérance d'utilité égal à celui de l'activité agricole soumise à l'aléa. Il s'agit donc d'un indicateur fondamental lorsqu'on s'intéresse au fonctionnement d'un marché d'assurance.

Dans le tableau 3, on mesure l'équivalent certain (euros par ha) ainsi que la prime de risque (euros par ha) en fonction de la nature du sol et des préférences pour le risque de l'agriculteur représentatif. Notons que, pour permettre une interprétation plus aisée des résultats, l'équivalent certain et la prime de risque sont calculés par unité de surface cultivée (ha). Les principaux enseignements que l'on peut tirer du tableau 3 sont les suivants. Tout d'abord, la prime de risque décroît avec le niveau d'aversion au risque. Il s'agit d'un résultat que l'on attendait. Par exemple, dans le cas d'un sol faiblement profond avec faible réserve utile (sol 1), un agriculteur fortement averse au risque est prêt à payer 24,17 euros par ha pour ne plus avoir à supporter de risque. A l'inverse, un agriculteur fortement riscophile ne sera prêt à recevoir de façon certaine l'espérance de son profit que si on le dédommage de 27,62 euros par ha. Comme le rappellent Belhaj Hassine et Thomas (2001) ou Groom *et al.* (2008), les agriculteurs sont caractérisés par de l'aversion au risque, les primes de risque seront donc positives. Ensuite, le degré d'aversion au risque a un impact très important sur le niveau de la prime de risque d'un agriculteur averse au risque. Dans le cas d'un sol fortement profond avec forte réserve utile (sol 3), un agriculteur fortement averse au risque est prêt à payer 31,26 euros par ha pour ne plus avoir à supporter de risque. Il s'agit d'un montant significatif puisque la prime de risque représente 5,2 % de la marge brute

Tableau 3. Equivalents certains et primes de risque en fonction de la nature du sol et des préférences pour le risque de l'agriculteur représentatif

Type de sol	Préférences pour le risque	Coefficient CRRA	Equivalent certain ^a		Prime de risque ^a	
			euros par ha	% de marge brute	euros par ha	% de marge brute
Sol 1	Fortement riscophobe	2	286,97	92,3	24,17	7,8
	Modérément riscophobe	0,8	539,57	97,6	13,42	2,4
	Faiblement riscophobe	0,2	549,81	99,4	3,18	0,5
	Faiblement riscophile	-0,2	556,08	100,6	-3,08	-0,6
	Modérément riscophile	-0,8	564,83	102,1	-11,83	-2,1
	Fortement riscophile	-2	580,61	105,0	-27,62	-5,0
Sol 2	Fortement riscophobe	2	503,15	94,2	30,84	5,8
	Modérément riscophobe	0,8	812,23	99,0	8,40	1,0
	Faiblement riscophobe	0,2	818,63	99,8	2,00	0,2
	Faiblement riscophile	-0,2	822,56	100,2	-1,93	-0,2
	Modérément riscophile	-0,8	828,01	100,9	-7,39	-0,9
	Fortement riscophile	-2	837,67	102,0	-17,05	-2,1
Sol 3	Fortement riscophobe	2	575,08	94,8	31,26	5,2
	Modérément riscophobe	0,8	833,35	99,0	8,54	1,0
	Faiblement riscophobe	0,2	838,57	99,8	2,00	0,2
	Faiblement riscophile	-0,2	843,81	100,2	-1,91	-0,2
	Modérément riscophile	-0,8	849,09	100,9	-7,20	-0,9
	Fortement riscophile	-2	858,06	101,9	-16,17	-1,9

Notes : ^(a) Les concepts d'équivalent certain et de prime de risque sont définis en annexe B.

Les résultats s'interprètent de la manière suivante. Pour un agriculteur fortement averse au risque, c'est-à-dire pour qui le coefficient d'aversion au risque est égal à 2, l'équivalent certain de son activité agricole dans le cas d'un sol de type 1 s'élève à 286,97 euros par ha (soit 92,3 % de sa marge brute moyenne) et sa prime de risque à 24,17 euros par ha (soit 7,8 % de sa marge brute moyenne).

moyenne ²⁴. Pour le même sol, un agriculteur faiblement averse au risque ne sera prêt à payer que 2,00 euros par ha, soit une somme négligeable (un peu plus de 0,2 % de sa marge brute moyenne). Enfin, la nature des sols n'a un impact sur la prime de risque que pour des préférences extrêmes vis-à-vis du risque. Pour des préférences de l'agriculteur vis-à-vis du risque allant de modérément averse à modérément riscophile, les niveaux des primes de risque sont assez proches pour les trois sols considérés (surtout pour les sols 2 et 3). Pour des préférences extrêmes, on constate des différences

²⁴ Bontems et Thomas (2000) obtiennent un ratio prime de risque/profit égal à 7,5 %.

significatives. Un agriculteur fortement averse au risque sera prêt à payer 31,26 euros par ha dans le cas d'un sol très profond (type 3) et seulement 24,17 euros par ha dans le cas d'un sol peu profond (type 1).

5. Une analyse de l'impact des sécheresses sur l'agriculture en Midi-Pyrénées

Dans cette section, l'environnement dans lequel évolue l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées est modifié et l'on étudie ses réactions à ce changement. On se place dans le cas d'un sol de type 3 (sol profond avec réserve utile importante), les résultats des simulations obtenus pour les sols de type 1 et 2 étant relativement proches.

5.1. Impact de l'augmentation de la fréquence des années « sèches »

Dans ce qui précède, la probabilité de réalisation associée à chaque année de l'historique (1972-2005) dans le programme d'optimisation de l'agriculteur P_2 est la même. Cela correspond à une hypothèse d'équiprobabilité de réalisation de chaque année climatique. On peut cependant penser que le réchauffement climatique va se traduire par une augmentation de la fréquence de réalisation des années « sèches » et l'on peut donc s'interroger sur l'impact de cette augmentation sur les décisions et sur la fonction « objectif » de l'agriculteur²⁵. Pour ce faire, on modifie les probabilités associées aux années climatiques en attribuant un poids plus important aux années de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003 et 2005), puis on résout le programme d'optimisation de l'agriculteur (P_1 , P_2). Dans ce qui suit, nous appliquons un coefficient multiplicateur au risque de sécheresse qui varie de 1 à 2, un coefficient de 2 signifie que la fréquence de réalisation d'une année de sécheresse est 2 fois plus élevée que dans le cas équiprobable.

Lorsqu'on introduit la possibilité de faire évoluer le système de culture pratiqué par l'agriculteur, il faut avoir à l'esprit que son comportement est dicté par deux logiques. D'une part, l'agriculteur va de manière générale chercher à limiter son exposition au risque chaque année, dans l'esprit des adaptations des stratégies de l'irrigation aux conditions pédoclimatiques de son exploitation précédemment décrites. Mais, l'irriguant peut également chercher à compenser une mauvaise année en termes de revenus par une prise de risque sur le système de culture le plus rentable l'année suivante en espérant recouvrer sa perte antérieure. Le système A (maïs irrigué) étant le plus rentable, l'agriculteur pourrait donc être tenté par une stratégie de choix de ce système de culture malgré sa vulnérabilité au risque de sécheresse dans une logique de lissage interannuel de ses revenus, une bonne année pouvant couvrir des pertes limitées d'autres années. Dans le cadre d'analyse retenu, on prend en compte ces deux logiques

²⁵ Le GIEC prévoit une augmentation de la variabilité du climat et de certains phénomènes extrêmes, et considère comme probable l'accroissement des risques de sécheresse estivale sur la plupart des zones terrestres continentales de moyenne altitude. Le lecteur intéressé pourra consulter la synthèse de l'expertise collective sécheresse de l'INRA, Amigues *et al.* (2006), pour une discussion sur les scénarios d'évolution possible du climat en France.

Tableau 4. Impact d'une augmentation de la fréquence des années de sécheresse sur le comportement et la fonction « objectif » de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées

Coefficient multiplicateur du risque de sécheresse	Caractéristiques de l'optimum			
	Court terme		Long terme	
	Systèmes de culture	Fonction obj.	Systèmes de culture	Fonction obj.
1		1044,6	A : 0,459 B : 0,192 C : 0,349	1044,6
1,2		1020,0 (- 2,36 %)	A : 0,176 B : 0,516 C : 0,307	1024,7 (- 1,91 %)
1,4	A : 0,459 B : 0,192 C : 0,349	995,4 (- 4,71 %)	A : 0,000 B : 0,780 C : 0,220	1013 (- 3,03 %)
1,6		970,8 (- 7,07 %)	A : 0,000 B : 0,980 C : 0,020	1005 (- 3,79 %)
1,8		946,2 (- 9,42 %)	A : 0,000 B : 1,000 C : 0,000	998,3 (- 4,44 %)
2		921,6 (- 11,78 %)	A : 0,000 B : 1,000 C : 0,000	991,6 (- 5,08 %)

Note : les valeurs entre parenthèses dans la colonne **Fonction obj.** donnent le pourcentage de perte de fonction « objectif » par rapport au cas d'un coefficient de multiplicateur du risque de sécheresse égale à 1. Par exemple, à court terme, la perte en terme de fonction « objectif » lorsque que l'on augmente le risque d'année sèche de 20 % (coefficient égal à 1.2) représente 2,36 % de la fonction « objectif » initiale.

et nos résultats correspondent au bilan économique de l'ensemble des arbitrages stratégiques et stratégiques auxquels l'agriculteur pourrait procéder dans une approche d'optimisation globale de ses revenus sur l'ensemble des années considérées.

Le tableau 4 permet de voir comment l'augmentation de la fréquence des années de sécheresse modifie les décisions de choix d'allocation de surface aux trois systèmes de culture et de mesurer le coût pour l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées de cette augmentation en termes de perte de fonction « objectif » (mesurée en espérance d'utilité nette des coûts spécifiques à chaque système de culture). Les principaux enseignements sont les suivants.

D'abord, à court terme, le choix de stratégie d'irrigation permet de limiter l'impact sur la fonction « objectif » d'une augmentation de la fréquence des années sèches, seulement dans le cas où celle-ci est modérée. A court terme, c'est-à-dire lorsque l'agriculteur n'est pas en mesure de modifier ses choix de système de culture et qu'il ne peut donc agir que sur ses décisions de stratégie d'irrigation, la perte liée à une

augmentation modérée (+ 20 %) de la fréquence des sécheresses reste elle-même modérée (perte de fonction « objectif » de 2,36 %). Les choix de stratégie d'irrigation permettent de limiter l'impact d'une augmentation modérée de la fréquence des années sèches. En revanche, lorsque le risque de sécheresse est multiplié par 2, la perte mesurée en terme de fonction « objectif » de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées devient substantielle puisqu'elle atteint 11,78 %. La flexibilité à court terme offerte par les choix de stratégie d'irrigation ne permet pas de limiter de manière significative la perte de fonction « objectif » dans le cas de très forte augmentation de la fréquence des années sèches.

A long terme, le choix de stratégie d'irrigation combiné à une réallocation des surfaces aux systèmes de culture permet de limiter l'impact sur la fonction « objectif » d'une augmentation, même forte, de la fréquence des années sèches. A long terme, la perte liée à l'augmentation de la fréquence des sécheresses ne dépasse pas 5,08 % de la fonction « objectif » de l'agriculteur représentatif : la réallocation des surfaces entre systèmes de culture A, B et C ainsi que les ajustements intra-annuels de stratégies d'irrigation permettent d'atténuer de manière sensible l'impact de l'augmentation du risque de sécheresse sur la fonction « objectif » de l'agriculteur représentatif (espérance d'utilité). D'autre part, à long terme, une augmentation modérée de la fréquence des années sèches se traduit par une baisse de la SAU allouée au système de culture A au profit des systèmes de culture B et C. Lorsque la fréquence des années sèches devient très forte, le système de culture B tend à dominer les deux autres.

Ainsi, les décisions de long terme de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées lui permettent de limiter l'impact de l'augmentation du risque de sécheresse sur sa fonction « objectif ». On peut alors se demander comment la réallocation des surfaces entre systèmes de culture permet d'atténuer l'impact de l'augmentation de la fréquence des sécheresses. Lorsqu'on augmente modérément le risque de sécheresse (de 1 à 1,2), l'agriculteur augmente la proportion de surface allouée aux systèmes de culture B (qui résiste *a priori* mieux que le système de culture A ou C au risque de sécheresse). A partir d'un coefficient multiplicateur 1,4, plus aucune surface n'est allouée au système de culture A. Au-delà, la diminution de la proportion de surface allouée au système de culture C (cultures en sec) s'accélère pour atteindre 0 % avec un coefficient multiplicateur proche de 1,8 (le risque de sécheresse est trop important pour continuer à faire des cultures en sec). Il est optimal, dans ce cas, pour l'agriculteur de consacrer toute sa surface agricole utile au système de culture B.

5.2. Impact de la limitation du niveau d'irrigation en cas d'année de « sécheresse »

Une des caractéristiques des années récentes de sécheresse a été la mise en place de limitations quantitatives des prélèvements en eau à usage agricole (*via* des arrêtés préfectoraux nommant). On peut donc anticiper que les phénomènes de sécheresse seront de plus en plus accompagnés par ces mesures, souvent administratives, de restriction des prélèvements agricoles en eau. Il est donc important pour la puissance publique d'évaluer les coûts (en terme de perte de fonction « objectif » de l'agriculteur) induits par ce type de restriction quantitative.

Pour se faire, on introduit maintenant dans le programme d'optimisation P_1 des contraintes de limitation du niveau d'irrigation en cas de sécheresse. Typiquement, le type de contrainte que l'on impose s'écrit :

$$\alpha_{ks} > 0 \text{ si et seulement si } WAT_{ks} \leq \overline{WAT}_k \text{ et } \{\text{sécheresse}\} \quad (12)$$

ce qui signifie que la part de surface sur laquelle l'agriculteur utilise la stratégie s dans le système de culture K au cours d'une année de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003 et 2005) est strictement positive, si et seulement si cette stratégie correspond à un apport total en eau lors de la campagne d'irrigation inférieur à \overline{WAT}_k mm/ha. Autrement dit, les stratégies d'irrigation qui dépassent ce seuil maximum ne peuvent pas être utilisées en cas d'année de sécheresse. Le principe de l'exercice consiste alors à étudier comment l'introduction de ce type de contrainte modifie le comportement de l'agriculteur et se traduit par une perte de fonction « objectif », en distinguant ici encore l'approche de court terme et de long terme. Les résultats de ces simulations sont présentés dans le tableau 5.

A court terme, le changement de stratégies d'irrigation permet à l'agriculteur de limiter l'impact sur la fonction « objectif » des limitations du niveau maximal d'irrigation. Par exemple, lorsque le niveau maximal d'irrigation en cas de sécheresse passe de 300 mm/ha à 240 mm/ha pour le système de culture A et de 120 mm/ha à 60 mm/ha pour le système de culture B, la perte de fonction « objectif »

Tableau 5. Impact de la limitation du niveau d'irrigation en cas d'année « sèche » sur l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées

Niveau maximum d'irrigation (mm/ha)			Caractéristiques de l'optimum					
			Court terme		Long terme			
A	B	C	Systèmes de culture	Fonction obj.	Systèmes de culture	Fonction obj.		
300	120	0		1044,65	A	B	C	
270	90	0	A : 0,459 B : 0,192 C : 0,349	1026,79 (- 1,71 %)	0,484	0,516	0,000	1037,96 (- 0,64 %)
240	60	0		997,42 (- 4,52 %)	0,350	0,650	0,000	1032,15 (- 1,20 %)
210	30	0		983,65 (- 5,84 %)	0,126	0,874	0,000	1023,40 (- 2,03 %)

Notes : les valeurs entre parenthèses dans les colonnes **Fonction obj.** donnent le pourcentage de perte de fonction « objectif » par rapport au cas initial (300 mm/ha pour A, 120 mm/ha pour B). Par exemple, la perte en terme de fonction « objectif » lorsque que l'on diminue de 30 mm les apports maximaux en eau les années sèches représente - 1,71 % de la fonction « objectif » initiale, à court terme.

représente 4,52 %. A long terme, la réallocation des surfaces entre systèmes de culture permet de limiter de manière très substantielle l'impact des restrictions d'irrigation. Passer à des irrigations maximales, en cas de sécheresse, égales à 210 mm/ha pour le système de culture A et à 30 mm/ha pour le système de culture B se traduit à long terme par une perte de -2,03 % de la fonction « objectif » de l'agriculteur (contre -5,84 % à court terme). Il convient de noter que cette perte est une perte mesurée en terme d'espérance d'utilité nette des coûts spécifiques à chaque système de culture. A long terme, à mesure que les contraintes d'apport maximum en eau (mm/ha) sont de plus en plus limitantes, augmenter les surfaces à allouer au système de culture B semble émerger comme une stratégie dominante.

5.3. Impact des interdictions d'irriguer en période d'étiage lors des années de « sécheresse »

Les sécheresses les plus sévères ont souvent été accompagnées par les autorités publiques par la mise en place d'interdiction d'irrigation lors des périodes les plus critiques. On introduit maintenant dans le programme d'optimisation P_1 ces contraintes d'interdiction d'irriguer sous la forme suivante :

$$\alpha_{kt} > 0 \text{ si et seulement si } WAT_{tk} = 0 \text{ pour } t \in \{T - b, \dots, T\} \text{ et } \{\text{sécheresse}\} \quad (13)$$

ce qui signifie que la part de surface sur laquelle l'agriculteur utilise la stratégie s dans le système de culture k au cours d'une année est strictement positive, si et seulement si cette stratégie ne nécessite aucune irrigation pendant les b dernières périodes de la campagne d'irrigation et si l'année est une année de sécheresse. Rappelons qu'une stratégie d'irrigation est un vecteur de 12 apports en eau, les dates d'apport étant réparties uniformément le long de la campagne d'irrigation. Dans le cas d'années de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003 et 2005), on va imposer une contrainte d'interdiction d'irriguer lors des périodes d'étiage, c'est-à-dire lors des périodes 9 à 12. Pour les autres (1 à 8), l'agriculteur ne fait face à aucune contrainte de limitation en eau.

5.3.1. Impact à court terme des interdictions d'irrigation

A court terme, l'agriculteur ne peut modifier que ses stratégies d'irrigation. L'impact des interdictions d'irrigation va alors dépendre de la faculté qu'il a à anticiper ou non ces interdictions. Dans le tableau 6, on distingue trois cas de figure. Le cas de référence « pas d'interdiction d'irriguer » correspond à une situation où l'agriculteur ne fait face à aucune interdiction d'irriguer en cas de sécheresse. La fonction « objectif » est égale à 1044,65. Les cas « interdictions anticipées » correspondent à des situations où l'agriculteur, à différentes périodes de l'année (1 à 8), sait qu'il va faire face à une interdiction d'irriguer aux cours des périodes 9 à 12. Il peut alors ré-optimiser ses stratégies d'irrigation de manière à maximiser sa fonction « objectif » sous la contrainte des interdictions d'irriguer à venir. Bien entendu, plus l'agriculteur est capable d'anticiper tôt les interdictions d'irriguer à venir (autrement dit, plus la puissance publique est en mesure d'annoncer tôt des interdictions d'irriguer), plus les possibilités de ré-optimisation des stratégies d'irrigation sont importantes et plus la perte de fonction « objectif » sera faible. Le cas « interdiction non-anticipée » correspond à une

Tableau 6. Impact des interdictions d'irriguer sur la fonction « objectif » de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées (choix de court terme)

		Fonction obj.
Pas d'interdiction d'irriguer		1044,65
Interdictions anticipées	1	940,76 (- 9,94 %)
	2	923,50 (- 11,60 %)
	3	919,86 (- 11,95 %)
	4	909,89 (- 12,90 %)
	5	898,19 (- 14,02 %)
	6	881,80 (- 15,59 %)
	7	860,05 (- 17,67 %)
	8	482,43 (- 53,82 %)
Interdiction non-anticipée		482,43 (- 53,82 %)

Note : les valeurs entre parenthèses dans les colonnes **Fonction obj.** donnent le pourcentage de perte de fonction « objectif » par rapport au cas sans restriction d'irrigation.

situation extrême où l'agriculteur apprend en début de période 9 qu'il lui est interdit d'irriguer pour les quatre dernières périodes. Il n'a donc aucune possibilité de ré-optimisation de ses stratégies d'irrigation. La perte en terme de fonction « objectif » est donc maximale.

Les principaux enseignements que l'on peut tirer du tableau 6 sont les suivants. Une information sur le risque d'interdiction d'irriguer en période d'étiage transmise de manière précoce aux agriculteurs permet de limiter de manière significative la perte de fonction « objectif ». On constate en effet que lorsque l'agriculteur est capable d'anticiper dès la première période les interdictions à venir, ce qui lui permet de ré-optimiser ses stratégies d'irrigation sous la contrainte de non-irrigation en période d'étiage, la perte en termes de fonction « objectif » de l'agriculteur est modérée puisqu'elle représente - 9,94 %. Dans le cas où l'agriculteur doit attendre la deuxième période pour savoir s'il y aura une interdiction d'irriguer, la perte de fonction « objectif » demeure relativement faible, - 11,56 %. La perte de fonction « objectif » est d'autant plus grande que la période à laquelle l'agriculteur apprend qu'il y aura une interdiction est tardive. C'est un résultat attendu et intuitif. La perte varie de - 9,94 % en première période à - 53,82 % en période 8. En revanche, il est intéressant de

remarquer que le fait pour l'agriculteur d'apprendre même tardivement qu'il va y avoir une interdiction d'irriguer lui permet de limiter sa perte (-15,59 % en période 6 et -17,67 % en période 7). Il est donc important pour la puissance publique d'annoncer les interdictions d'irrigation, même tardivement.

Lorsque l'agriculteur ne peut pas anticiper les interdictions d'irrigation en période d'étiage lors des années sèches, sa perte de fonction « objectif » est très importante puisqu'elle atteint -58,60 % de sa fonction « objectif ». A court terme, c'est-à-dire lorsque l'agriculteur ne peut pas réallouer librement ses surfaces entre les trois systèmes de culture, dans le cas où il ne peut ni réallouer librement ses surfaces entre les trois systèmes de culture et anticiper les contraintes de non-irrigation en période d'étiage, la perte de fonction « objectif » est très importante (-53,82 %). Ce résultat suggère qu'une information disponible en début de campagne sur le risque de sécheresse et la possibilité d'interdiction d'irrigation en période d'étiage permettent de réduire de manière considérable le coût de l'interdiction d'irrigation pour l'agriculteur, la valeur de cette information étant, dans ce cas, très élevée.

5.3.2. *Impact à long terme des interdictions d'irrigation*

A long terme, l'agriculteur peut maintenant modifier les parts de SAU qu'il alloue à chaque système de culture. Cela lui permet de disposer de plus de flexibilité de manière à essayer d'atténuer l'impact des épisodes de sécheresse. Bien entendu, il peut toujours modifier ses stratégies d'irrigation, lorsqu'il anticipe l'interdiction à venir.

Il est possible que, même à long terme, les possibilités de réallocation des surfaces entre systèmes de culture soient limitées du fait, par exemple, de contraintes techniques non modélisées ici. On peut penser que des surfaces sur lesquelles ont été réalisés des investissements lourds en matériel d'irrigation ne seront pas aisément converties en culture en sec. Pour capturer ce type de phénomène, on va imposer dans le programme de l'agriculteur une contrainte supplémentaire de restriction des possibilités de réallocation des surfaces aux systèmes de culture par rapport à l'optimum sans interdiction d'irriguer. De façon plus précise, dans certains cas, on va supposer que lorsque l'agriculteur fait face à une contrainte d'interdiction d'irriguer en période d'étiage, il ne peut augmenter ou réduire les parts de SAU qu'il alloue à chaque système de culture que de + ou -20 % par rapport à son optimum sans interdiction d'irriguer. Cela correspond à une situation où l'agriculteur est contraint dans ces choix de réallocations de surface entre systèmes de culture. On s'attend à une perte de fonction « objectif » plus importante dans ce cas.

Les résultats des simulations sont présentés dans le tableau 7. Dans un premier temps, il est utile de rappeler les caractéristiques de l'optimum en l'absence de toute contrainte d'interdiction d'irriguer. A l'optimum, la fonction « objectif » est égale à 1044,65 et les parts de surface allouées aux système de culture A, B et C sont respectivement égale à 0,459, 0,192 et 0,349. On va alors comparer ce cas de référence à la situation où la puissance publique instaure des interdictions d'irriguer lors des périodes d'étiage (période 9-12), dans le cas d'années de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003 et 2005).

Tableau 7. Impact des interdictions d'irriguer sur la fonction « objectif » de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées (choix de long terme)

		Restriction sur les possibilités de réallocation des surfaces ^a	Part de surface allouée aux systèmes de culture			Fonction obj. ^b	
			A	B	C		
Pas d'interdiction d'irriguer	--	non	0,459	0,192	0,349	1 044,65	
Interdictions anticipées	Date à laquelle l'interdiction est anticipée	1	non	0,000	0,991	0,009	1 025,10 (- 1,87 %)
		1	oui	0,368	0,230	0,402	968,88 (- 7,25 %)
		4	non	0,000	0,991	0,009	1025,10 (- 1,87 %)
		4	oui	0,368	0,230	0,402	928,59 (- 11,11 %)
		7	non	0,000	0,991	0,009	1 025,10 (- 1,87 %)
		7	oui	0,368	0,230	0,402	889,05 (- 14,89 %)
Interdiction non anticipée		non	0,000	0,991	0,009	1 025,10 (- 1,87 %)	
		oui	0,368	0,230	0,402	495,94 (- 52,52 %)	

Notes : ^a : « non » correspond à la situation où aucune contrainte sur la réallocation des parts de surface n'est imposée *a priori* à l'agriculteur ; « oui » correspond à une situation où l'agriculteur peut augmenter ou réduire ses parts de surface au maximum de + ou - 20 % par rapport à son optimum sans interdiction d'irriguer.

^b : les valeurs entre parenthèses dans les colonnes Fonction obj. donnent le pourcentage de perte de fonction « objectif » par rapport au cas sans restriction d'irrigation.

Les principaux enseignements que l'on peut tirer du tableau 7 sont les suivants. Premièrement, la perte de fonction « objectif » est d'autant plus grande que la période à laquelle l'agriculteur apprend qu'il y aura une interdiction est tardive. C'est un résultat ici encore attendu et intuitif. Ensuite, en l'absence de contrainte sur les possibilités de réallocation des surfaces aux systèmes de culture, la perte résultant des interdictions d'irriguer lors des périodes d'étiages est modérée (- 1,87 %), que l'agriculteur anticipe ces interdictions dès la première période ou non. En revanche, si le fait de ne pas pouvoir réallouer librement les surfaces entre systèmes de culture à un impact sur la fonction « objectif » modéré dans le cas où les restrictions sont anticipées (de - 7,25 % à - 14,89 %), cet impact devient très négatif dans le cas où les restrictions ne sont pas anticipées (- 52,82 %). De manière plus générale, les décisions de long terme de l'agriculteur permettent d'atténuer de manière très importante le coût des restrictions d'irrigation en période d'étiage. Par exemple, à court terme, la perte de fonction « objectif » induite par une interdiction anticipée dès la première période

représente - 7,25 %. Dans les mêmes conditions mais à long terme, la perte représente seulement - 1,87 %. Lorsque l'interdiction d'irriguer ne peut pas être anticipée, la perte de fonction « objectif » représente respectivement à court et à long terme - 53,82 % et - 1,84 %.

6. Conclusion

Nous avons analysé l'impact du risque de sécheresse sur la fonction « objectif » de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées en distinguant les décisions optimales de court terme (choix des stratégies d'irrigation) et celles de long terme (choix des systèmes de culture). La méthode développée a consisté à utiliser des sorties de simulations d'un modèle agronomique (STICS) dans un modèle d'optimisation économique du comportement de l'agriculteur.

En termes de possibilités d'adaptation de l'agriculteur face au risque de sécheresse, nous avons montré qu'à court terme, c'est-à-dire à système de cultures donné, il apparaît que les capacités d'adaptation des agriculteurs (*via* le choix des stratégies d'irrigation) semblent assez limitées et, donc, que le coût économique induit par les épisodes de sécheresse peut être élevé pour l'agriculteur. Par exemple, multiplier par 2 le risque de réalisation d'une année sèche se traduit par une perte de 11,78 % de la fonction « objectif » de l'agriculteur. Imposer des interdictions d'irrigation en période d'étiage lors d'une année de sécheresse et lorsque l'agriculteur n'est pas à même de les anticiper se traduit par une perte de sa fonction « objectif » supérieure à 50 %. Il convient de relever que, même à court terme et dans le système de culture A (monoculture maïs irrigué), l'agriculteur apparaît sensible à l'outil tarifaire. Un doublement du prix unitaire de l'eau se traduirait par une baisse de l'irrigation de 25,5 % en cas de sécheresse.

A long terme, c'est-à-dire lorsque l'agriculteur peut modifier ses systèmes de culture, les résultats des simulations économiques suggèrent une situation assez différente. Il apparaît en effet que l'adaptation des systèmes de culture permet de limiter de manière très sensible le coût privé pour l'agriculteur des épisodes de sécheresse. Par exemple, la perte résultant du doublement de la fréquence des sécheresses est divisée par deux dans le cas où des réallocations des surfaces entre systèmes de cultures sont possibles (5,08 % contre 11,78 %). Ainsi la réallocation des surfaces entre systèmes de culture combinée aux ajustements intra-annuels de stratégies d'irrigation permet d'atténuer de manière sensible l'impact de l'augmentation du risque de sécheresse sur la fonction « objectif » de l'agriculteur représentatif (critère d'espérance d'utilité).

Nous avons également montré qu'il était important pour l'agriculteur d'anticiper le risque de sécheresse et les interdictions d'irriguer. A court terme, une information sur le risque d'interdiction d'irriguer en période d'étiage transmise de manière précoce aux agriculteurs permet de limiter de manière significative la perte de fonction « objectif ». De plus, la perte de fonction « objectif » est d'autant plus grande que la période à laquelle l'agriculteur apprend qu'il y aura une interdiction est tardive. En revanche, toujours à court terme, lorsque l'agriculteur ne peut pas anticiper les

interdictions d'irrigation en période d'étiage lors des années sèches, sa perte de fonction « objectif » est très importante (elle atteint $-53,82\%$ de sa fonction « objectif »). A long terme (l'agriculteur est capable de réallouer librement ses surfaces entre les trois systèmes de culture), la perte résultant des interdictions d'irriguer lors des périodes d'étiage est modérée, que l'agriculteur anticipe ou non ces interdictions dès la première période (perte de $-1,80\%$). Les décisions de long terme de l'agriculteur permettent d'atténuer de manière très importante le coût des restrictions d'irrigation en période d'étiage. Par exemple, à court terme, la perte de fonction « objectif » induite par une interdiction anticipée dès la première période représente $-9,94\%$. Dans les mêmes conditions, mais à long terme, la perte représente seulement $-1,87\%$. Il semble également qu'une information disponible en début de campagne pour l'agriculteur sur le risque de sécheresse et la possibilité d'interdiction d'irrigation en période d'étiage permette de réduire de manière considérable le coût privé de l'interdiction d'irrigation pour l'agriculteur en cas de sécheresse. Lorsque cette information est disponible, la perte mesurée en termes de fonction « objectif » représente pour l'agriculteur $9,94\%$ à court terme contre plus de 50% sans information. Ce résultat nécessite toutefois des travaux supplémentaires de validation. En termes de recommandation de politique économique, ces résultats suggèrent qu'il est important pour le décideur public de faciliter les changements de systèmes de culture, *via* la mise en place de mécanismes incitatifs, d'aide technique, ou de transmission d'information, par exemple. Ces résultats suggèrent également que des mécanismes d'alerte précoce des sécheresses peuvent générer des gains substantiels pour l'agriculture (on ne tient cependant pas compte ici qu'en annonçant une sécheresse la puissance publique peut se tromper et que cette erreur d'annonce peut se traduire par un coût pour l'agriculture).

Le modèle d'optimisation du comportement de l'agriculteur que nous avons développé permet de répondre à un certain nombre de questions qui apparaissent, pour l'économiste, fondamentales pour appréhender de manière pertinente l'impact de la sécheresse sur l'agriculture en France. Ce travail ouvre la porte à de multiples extensions qui nécessiteraient de plus amples travaux de recherche en économie agricole, notamment sur l'impact de l'aversion au risque de l'agriculteur sur ses décisions optimales de court et de long termes, sur l'introduction d'autres variables de décisions jugées pertinentes (modifications des dates de semis, décision d'investissement dans des ouvrages hydrauliques tels que des retenues collinaires). On pourrait également s'intéresser de manière plus précise à la mise en place de mécanismes d'annonce précoce des sécheresses par la puissance publique et au calcul de la date optimale d'annonce. La date optimale d'annonce de la sécheresse par la puissance publique devrait mettre en balance le gain pour l'agriculteur résultant des adaptations en termes de stratégie d'irrigation rendues possibles par cette annonce précoce avec la perte résultant d'un comportement trop précautionneux dans le cas où la sécheresse annoncée ne se produit pas.

Bibliographie

- Amigues J.-P., Debaeke P., Itier B., Lemaire G., Seguin B., Tardieu F. et Thomas A. (2006) Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau, Expertise scientifique collective, synthèse du rapport, INRA (France), 72 p.
- Antle J.M. (1987) Econometric estimation of producers' risk attitudes, *American Journal of Agricultural Economics* 69, 509-522.
- Belhaj Hassine N., 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.
- Bergez J.-E., Debaeke P., Deumier J.-M., Lacroix B., Leenhardt D., Leroy P. and Wallach D. (2001) MODERATO: An object-oriented decision model to help on irrigation scheduling for corn crop, *Ecological Modelling* 137(1), 43-60.
- Bontems P., Thomas A. (2006) Regulating nitrogen pollution with risk-averse farmers under asymmetric information and moral hazard, *American Journal of Agricultural Economics* 88(1), 57-72.
- Bontems P., Thomas A. (2000) Risk premium and value of information: The case of split nitrogen application for corn crop, *American Journal of Agricultural Economics* 82, 59-70.
- Bosch D.J., Eidman V.R. (1987) Valuing information when risk preferences are nonneutral: An application to irrigation scheduling, *American Journal of Agricultural Economics* 69(3), 658-668.
- Bouzaher A., Cae R., Johnson S., Manale A. and Shogren F.J. (1995) CEEPES: An evolving system for agroenvironmental policy, in: *Integrating Economic and Ecological indicators. Practical Methods for Environmental Policy Analysis*, J.W. Milon, J.F. Shogren (eds) Chapitre 5, New York, Praeger Publishers, 67-89.
- Brisson N., Huard F., Graux A.-I., Lebas C. et Debaeke P. (2006) Impacts de la variabilité des facteurs responsables de la sécheresse agricole à l'échelle du territoire par une approche de modélisation biophysique, Document de travail réalisé dans le cadre de l'expertise collective sécheresse de l'INRA, 30 p.
- Brisson N., Gary C., Justes E., Roche R., Mary B., Ripoche D., Zimmer D., Sierr J., Bertuzzi P., Burger P., Bussièrre F., Cabidoche Y.-M., Cellier P., Debaeke P., Gaudillère J.-P., Maraux F., Seguin F.-B. and Sinoquet H. (2002) An overview of the crop model STICS, *European Journal of Agronomy* 18, 309-332.
- Burt O.R., Stauber M.S. (1971) Economic analysis of irrigation in a subhumid climate, *American Journal of Agricultural Economics*, 53, 33-46.
- Caswell M., Zilberman D. (1985) The choices of irrigation technologies in California, *American Journal of Agricultural Economics* 67(2), 224-234.

- Chavas J.-P., Holt M.T. (1996) Economic behavior under uncertainty: A joint analysis of risk preferences and technology, *Review of Economics and Statistics* 78, 329-335.
- Chavas J.-P., Holt M.T. (1990) Acreage decisions under risk: The case of corn and soybeans, *American Journal of Agricultural Economics* 72, 529-538.
- Coble K., Heifner R. and Zuniga M. (2000) Implications of crop yield and revenue insurance for producer hedging, *Journal of Agricultural and Resource Economics* 25(2), 432-442.
- Couture S. (2000) Aspects dynamiques et aléatoires de la demande en eau d'irrigation, Thèse de l'Université des Sciences sociales de Toulouse, 386 p.
- Dudley N.J, Howell D.T. and Musgrave W.F. (1971) Optimal intraseasonal irrigation water allocation, *Water Resources Research* 7(4), 770-788.
- European Environmental Agency (EEA) (2007) Climate change and water adaptation issues, EEA Technical report No 2/2007, Office for Official Publications of the European Communities, Luxembourg.
- Flichman G., Jacquet F. (2003) Le couplage des modèles agronomiques et économiques : intérêt pour l'analyse des politiques, *Cahiers d'économie et sociologie rurales* 67, 51-69.
- Groom B.P., Koundouri P., Nauges C. and Thomas A. (2008) The story of the moment: Risk-phobe Cypriot farmers respond to drought management, *Applied Economics* 40, 315-326.
- Holt C.A., Laury S.K. (2002) Risk aversion and incentive effects, *The American Economic Review* 92(5), 1644-1655.
- Howitt R.E. (1995a) Positive mathematical programming, *American Journal of Agricultural Economics* 77(2), 329-342.
- Howitt R.E. (1995b) Calibration methods for agricultural economic production models, *Journal of Agricultural Economics* 46(2), 147-159.
- Howitt R.E., Reynaud A. (2003) Spatial disaggregation of agricultural production data using maximum entropy, *European Review of Agricultural Economics* 30(3), 1-29.
- IPCC (2007) Climate change 2007: Synthesis report, Contribution of working groups I, II and III to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Core writing team, Pachauri R.K., Reisinger A. (eds.)], IPCC, Geneva, Switzerland, 104 pp.
- Itier B. (2008) Agriculture et sécheresse : le contexte et les enjeux, *Innovations Agronomiques* 2, 1-8.
- Just R.E., Pope R.D. (2002) The agricultural producer: Theory and statistical measurement, in: *Handbook of Agricultural Economics*, Gardner B., Rausser G.C. (eds), New York, Elsevier-North-Holland, 631-741.
- Just R.E., Pope R.D. (1979) Production function estimation and related risk considerations, *American Journal of Agricultural Economics* 71, 276-284.

- Just R.E., Pope R.D. (1978) Stochastic specification of production functions and econometric implications, *Journal of Econometrics* 7, 67-86.
- Koundouri P., Nauges C. and Tzouvelekas V. (2006) Technology adoption under production uncertainty: Theory and application to irrigation technology, *American Journal of Agricultural Economics* 88(3), 657-670.
- Mahul O., Wright B. (2003) Designing optimal crop revenue insurance, *American Journal of Agricultural Economics* 85, 580-589.
- Mapp H.P., Bernardo D.J., Sabbagh G.J., Geleta S. and Watkins K.B. (1994) Economic and environmental impacts of limiting nitrogen use to protect water quality: A stochastic regional analysis, *American Journal of Agricultural Economics*, 76(4), 889-903.
- Poupa J.-C. (2006) Rétro-ingénierie de programmes Fortran. Application au modèle de simulation STICS, miméo, INRA Rennes.
- Rao N.H., Sarma P.B.S. and Chander S. (1990) Optimal multicrop allocation of seasonal and intraseasonal water, *Water Resources Research* 26(4), 551-559.
- Schaible G.D., Kim C.S. and Whittlesey N.K. (1991) Water conservation potential from irrigation technology transitions in the Pacific Northwest, *Western Journal of Agricultural Economics* 16(2), 194-206.
- Yaron D., Dinar A. (1982) Optimal allocation of farm irrigation water during peak seasons, *American Journal of Agricultural Economics* 64, 681-689.
- Zilberman D., Dinar A., MacDougall N., Khanna M., Brown C. and Castillo F. (2003) Individual and institutional responses to drought: The case of Californian agriculture, Working Paper, Dept. of Agr. and Res. Econ., University of California, Berkeley.

ANNEXES

ANNEXE A. PARAMÉTRISATION DU MODÈLE BIOPHYSIQUE STICS

STICS est un modèle de croissance de cultures fonctionnant à pas de temps journalier, développé par l'INRA depuis 1996 (voir Brisson *et al.*, 2002, pour une présentation récente de ce modèle). STICS réalise des simulations à l'échelle des rotations en continu sur une série climatique, faisant se succéder des phases de culture et d'interculture. La dynamique est journalière, imposée par le pas de temps climatique, le climat constituant avec le sol et l'itinéraire technique l'ensemble des données d'entrée du modèle. Les données de sorties sont agronomiques (date de récolte, rendement, qualité, consommation d'eau et d'azote) ou environnementales (infiltration profonde, lixiviation de nitrates, température de la surface). STICS simule le fonctionnement carboné (croissance des plantes et élaboration du rendement), énergétique (interception du rayonnement solaire, températures du couvert et du sol), hydrique (évaporation du sol, transpiration des plantes, drainage) et azoté (minéralisation de la matière organique, transport des nitrates, fixation de l'azote atmosphérique par les légumineuses) de l'agrosystème.

Dans ce qui suit, on décrit les principales caractéristiques des sols, des itinéraires techniques et des climats retenus pour la région Midi-Pyrénées. Pour plus de détails sur le modèle STICS, le lecteur intéressé pourra se référer à Brisson *et al.* (2002). Concernant le paramétrage du modèle STICS pour la région Midi-Pyrénées, le lecteur intéressé pourra consulter Brisson *et al.* (2006).

A.1. Paramétrisation des sols

Tableau A1. Principales caractéristiques des sols retenus en Midi-Pyrénées

	Sol	RU ¹ (mm)	Profondeur (cm)	MO ² (%)	Mulch ³
Type 1	brun calcaire argileux	85	50	0,8	*
Type 2	alluvial calcaire	116	80	1,5	**
Type 3	brun calcaire	182	110	1,3	*

Notes : ¹ RU : réserve utile. ² MO : matière organique. Une bonne fertilité des sols correspond à une teneur en matière organique élevée et une faible teneur en calcaire actif qui bloque la minéralisation. ³ Selon les propriétés de surface du sol, se formera plus ou moins rapidement une couche sèche, appelée mulch naturel, protectrice vis-à-vis de l'évaporation.

Le choix des sols s'est fait à partir de la carte pédologique au 1/1 000 000^e sur la base de leur réserve utile, caractérisant leur capacité de stockage l'eau, et de leur représentativité significative dans la région Midi-Pyrénées. Ainsi, ont été retenus un sol à faible réserve utile (entre 40 et 100 mm), un sol à forte réserve utile (supérieure à 160 mm) et un sol intermédiaire (réserve utile entre 100 et 160 mm).

A.2. Paramétrisation des itinéraires techniques

Tableau A2. Principales caractéristiques des itinéraires techniques retenus en Midi-Pyrénées

Système de culture	Culture (variété)	Date de semis	Fertilisation KgN ha ⁻¹
A Maïs	Maïs (Cécilia)	15/04	250 (2)
	Blé dur (Nefer)	10/11	210 (3)
B Blé dur Blé dur Sorgho	Blé dur (Nefer)	01/10	170 (2)
	Sorgho (DK18)	25/04	120 (2)
	Blé dur (Nefer)	10/11	170 (2)
C Blé dur Tournesol	Tournesol (Mélody)	15/04	60 (1)

Les itinéraires techniques correspondants aux trois systèmes de culture retenus sont synthétisés dans le tableau A.2. Les précédents culturaux jouent un rôle sur l'état hydrique et minéral du sol au semis et fournissent des résidus qui sont enfouis lors des opérations de travail du sol supposées conventionnelles (déchaumage, labour, façons superficielles avant semis). A chaque variété de culture est associé un fichier de données qui décrit les caractéristiques physiques.

A.3. Paramétrisation du climat

Tableau A3. Extrait du fichier climatique pour l'année 1979 en Midi-Pyrénées

Station	Année	Mois	Jour/mois	Jour/année	T° min	T° max	R	ETP	Pluie
Toulouse	1979	1	1	1	1	11,8	2,1	0,6	9
Toulouse	1979	1	2	2	-5	0,3	9,1	0	0
...
Toulouse	1979	12	29	363	4,2	9,8	3,5	0,9	0
Toulouse	1979	12	30	364	10,0	11,5	2,1	1,3	3

Les données climatiques, présentées dans le tableau A.3, proviennent de la station météorologique de Toulouse pour laquelle nous disposons de 33 années d'historiques journaliers (de 1972 à 2005) pour lesquelles on observe : la température minimale moyenne (T° min), la température maximale moyenne (T° max), le rayonnement cumulé (R), l'ETP Penman cumulé (ETP) et la pluie cumulée (mm).

ANNEXE B. CALCUL DE LA PRIME DE RISQUE

Supposons que le profit stochastique d'un exploitant agricole (stochastique du fait, par exemple, d'un aléas climatique) puisse être représenté par une variable aléatoire \tilde{x} . Cet exploitant agricole valorise ce profit aléatoire *via* une fonction d'utilité strictement croissante, notée $U(\cdot)$.

On définit alors l'**équivalent certain** du profit, \bar{W} comme le niveau certain de richesse permettant d'obtenir un niveau d'espérance d'utilité égal à celui de l'activité agricole soumise à l'aléa. Par définition, l'équivalent certain est défini par :

$$U(\bar{W}) = EU(\tilde{x})$$

L'agriculteur est alors indifférent entre recevoir le profit \bar{W} avec certitude et la situation risquée caractérisée par la variable aléatoire \tilde{x} .

La **prime de risque** découle très naturellement de l'équivalent certain. La prime de risque est définie comme le montant monétaire, P , que l'agriculteur est prêt à sacrifier pour éviter toute forme de risque. La prime de risque est définie par la condition suivante :

$$U(E(\tilde{x}) - P) = EU(\tilde{x})$$

En d'autres termes, la prime de risque est le montant monétaire que l'agriculteur est prêt à payer pour recevoir le niveau de profit espéré tout en conservant un niveau d'espérance d'utilité égal à celui de l'activité agricole soumise à l'aléa. Le lien entre la prime de risque et l'équivalent certain est immédiat :

$$P = E(\tilde{x}) - \bar{W}$$

On a alors une relation entre les préférences de l'agriculteur vis-à-vis du risque et le signe de la prime de risque. Lorsque l'agriculteur est neutre, averse ou aime le risque, la prime de risque est respectivement nulle, positive et négative.

En utilisant la forme CRRA de la fonction d'utilité de l'agriculteur représentatif et les programmes d'optimisation P_1 et P_2 , on obtient après quelques calculs :

$$\bar{W} = \{(1 - \alpha) \times [E\hat{U}(\tilde{\mathcal{E}}, \alpha_A, \alpha_B, \alpha_C) + \sum_{k=A,B,C} \delta^k \times C^k]\}^{\frac{1}{1-\alpha}}$$

Le calcul de la prime de risque est alors immédiat en utilisant les formules précédentes. Pour plus de lisibilité, on reporte dans le texte la prime de risque et l'équivalent certain par ha qui sont simplement obtenus en divisant P et \bar{W} par la surface agricole utile (SAU).