



**Modélisation de l'impact économique
de la sécheresse sur les grandes cultures :
une approche par couplage de modèles biophysiques
et économiques pour la région Midi-Pyrénées**

Arnaud Reynaud (LERNA, Toulouse)

Etude réalisée Laboratoire d'Economie des Ressources Naturelles
pour le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (MAP)

Octobre 2006

Avant propos

Cette étude a été réalisée par le Laboratoire d'Economie des Ressources Naturelles (LERNA, UMR INRA et Université des Sciences Sociales de Toulouse 1) pour le ministère de l'Agriculture et de la Pêche (MAP).

L'Expertise scientifique collective (ESCo) "Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau" a mis en évidence un manque de références bibliographiques concernant des données quantifiées sur les impacts agronomiques et économiques de la sécheresse en France. La présente étude a pour objet de pallier ce manque en montrant que, pour une région française donnée, la modélisation microéconomique permet de quantifier et d'analyser l'impact des sécheresses sur les décisions et sur la fonction objectif des agriculteurs. Ce travail s'inscrit donc dans une perspective de recherche et l'on s'écarte quelque peu de l'exercice de mise en perspective de la bibliographie scientifique de l'ESCo. A cet égard, il constitue la première tentative de couplage entre un modèle agronomique et un modèle de calcul économique pour la simulation de l'impact économique d'une sécheresse sur données françaises.

Cette étude illustre le potentiel de recherche pluridisciplinaire au sein de l'INRA en contexte d'expertise finalisée. Grâce à la collaboration avec l'unité Agroclim de l'INRA Avignon, les économistes du LERNA ont pu calibrer les principales caractéristiques pédoclimatiques et agronomiques (types de sols, références climatiques, variétés cultivées) représentatives de la zone choisie pour l'étude économique, la Région Midi-Pyrénées.

Le LERNA a ensuite développé un modèle économique permettant d'analyser et de quantifier l'impact des sécheresses sur l'agriculture en Midi-Pyrénées. Ce modèle économique a été couplé avec le simulateur agronomique STICS antérieurement développé par l'INRA Avignon. Le paramétrage du simulateur agronomique STICS a été opéré à partir du référentiel agronomique établi pour la région Midi-Pyrénées, référentiel présenté dans Brisson et al. (2006) et repris à l'annexe 2 du présent document.*

L'étude que nous présentons s'attache en particulier à répondre, au moyen d'outils d'optimisation et de simulation, à la question suivante : les décisions des agriculteurs à court terme (choix de tactiques d'irrigation) et à long terme (choix de systèmes de culture) permettent-elles une réduction significative du coût imposé à l'agriculture en Midi-Pyrénées par la sécheresse ?

* N. Brisson, F. Huard, A.I. Graux, C. Lebas, P. Debaeke, G. Lemaire, B. Itier : "Evaluation régionale de l'impact de la sécheresse agricole à l'aide d'un modèle biophysique", Etude réalisée par l'unité AGROCLIM de l'INRA pour le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche (MAP), octobre 2006.

1. Introduction : une approche par couplage de modèle biophysique et économique

Une mesure correcte du coût économique de la sécheresse pour l'agriculteur ne peut pas se faire sans les deux éléments fondamentaux suivants :

- une connaissance précise de la relation qui existe entre la quantité d'eau apportée aux plantes par l'irrigation (avec prise en compte de la date de ces apports) et le niveau de production final ;
- une modélisation du comportement de l'agriculteur qui intègre les principales décisions (de court et de long terme) qui peuvent être prises de manière à limiter le coût de la sécheresse.¹

Une manière de procéder pour intégrer ces deux éléments fondamentaux consiste alors à intégrer des sorties de simulations d'un modèle agronomique de croissance de plante dans un programme d'optimisation du comportement de l'agriculteur. Ce type d'approche est décrite de manière assez exhaustive dans un article récent (Flichman et Jacquet, 2003).

Le dispositif mis en place est destiné à analyser l'impact de la sécheresse sur les décisions d'irrigation et sur les choix de systèmes de culture des agriculteurs dans la région Midi-Pyrénées. Pour cela, on utilise un modèle agronomique (STICS²) permettant de 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 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, Couture (2000). Pour étudier l'impact de la sécheresse sur le comportement et la fonction objectif de l'agriculteur, il paraît peu approprié de se limiter aux données généralement utilisées par les économistes agricoles (volume de production et inputs agrégés), qui ne renseignent que sur les rapports entre rendement et volume d'eau appliqué *total* mais pas sur les relations entre l'output et la répartition *intra-annuelle* de ce volume. Un simulateur agronomique présente en outre plusieurs avantages. C'est un moyen peu coûteux d'acquérir de l'information (les simulations sont un substitut à des expérimentations à grandes échelles) qui permet de générer des données qui correspondent à 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).

A partir des couples (schémas d'irrigation/rendements) générés pour chaque système de culture par le simulateur agronomique, le modèle économique identifie les choix optimaux en terme de système de culture devant être utilisé ainsi que les combinaisons d'itinéraires techniques (essentiellement apports en eau) – d'un point de vue économique – étant donnée une offre d'eau limitée aux différentes périodes. Ce procédé permet de mesurer l'impact d'un changement du contexte économique ou

1. L'utilisation de modèles mathématiques dynamiques pour analyser le problème de l'allocation intra-saisonnière de l'eau pour l'irrigation a été étudié par les économistes depuis le début des années 1970. On peut par exemple citer Dudley et al. (1971) qui cherchent à déterminer la conduite d'irrigation optimale au cours d'une saison dans un univers risqué et lorsque la quantité d'eau est fixée ex-ante pour la campagne. Yaron et Dinar (1982) analysent l'allocation optimale de l'eau d'irrigation durant les périodes de pointe au niveau d'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.

2. Le modèle français STICS, développé à l'INRA depuis 1996 en collaboration avec des partenaires scientifiques et techniques, s'appuie sur des principes largement admis dans la communauté, voir Brisson et al. (1998) ou bien Brisson et al. (2003). 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.

climatique sur les décisions d'un agriculteur (choix des tactiques d'irrigation et des systèmes de culture) et de déterminer ses fonctions de meilleures réponses à un changement de son environnement (naturel ou économique). Ainsi, l'analyse associe à la fois des informations agronomiques (sol, climat, paramètres techniques) et économiques (prix, contraintes) qui sont les deux ensembles de facteurs externes par rapport auxquels les agriculteurs prennent leurs décisions d'irrigation et de systèmes de culture.

Comme l'indique Flichman et Jacquet (2003), le couplage des modèles agronomiques et économiques remonte au début des années 1990. Cette approche 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. Plus tard, les travaux utilisant des méthodes de couplage ont porté sur la question de la gestion de la pollution diffuse d'origine agricole et sur des problèmes de gestion de pollution par les nitrates ou bien par les pesticides (Mapp et al., 1994 et Bouhzaher et al., 1995).

Dans ce qui suit, on décrit tout d'abord le modèle économique décrivant le comportement de l'agriculteur. Dans la section 3, on présente ensuite le modèle empirique pour la région Midi-Pyrénées. Les sections 4 et 5 de cette étude sont consacrées à l'analyse des résultats des simulations économiques. Dans la section 6, nous résumons les principaux résultats et nous présentons quelques pistes de recherches en économie agricole.

2. Le modèle économique de décision de l'agriculteur

Nous présentons ici de manière non technique le modèle économique de décision de l'agriculteur en univers incertain. La présentation formalisée de ce modèle se trouve en annexe 1.

2.1. Les décisions possibles de l'agriculteur

Considérons un agriculteur représentatif d'une zone géographique et d'un contexte pédo-climatique donnés. Chaque année, un aléa qui représente les conditions climatiques (ETP, pluviométrie, rayonnement solaire...) est tiré dans une distribution de probabilités connue de l'agriculteur. Pour gérer au mieux les réalisations possibles de ces aléas climatiques, l'agriculteur peut prendre 2 types de décisions que nous détaillons maintenant.

- *Décisions de court terme (intra-annuelle)*

A court terme, c'est-à-dire à l'échelle intra-annuelle, les assolements sont fixés et les seules variables d'ajustement dont dispose l'agriculteur sont les tactiques d'irrigation qui peuvent être associées à chaque culture. On entend par tactique d'irrigation associée à une culture un vecteur de dates et de niveaux d'apports en eau tout au long de la campagne d'irrigation. Dans ce qui suit, lorsqu'on parlera de décisions à court terme de l'agriculteur, il s'agira donc des choix intra-annuels de tactiques d'irrigation.

- *Décision de long terme (inter-annuelle).*

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 modifiées par l'agriculteur de manière à maximiser sa fonction objectif. L'hypothèse sous-jacente est que ces choix de systèmes de culture sont effectués une fois pour toutes par l'agriculteur (étant donnée la distribution de l'aléa climatique et étant donné l'ensemble des paramètres du modèle) et qu'ils ne peuvent pas être optimisés chaque année en fonction de la réalisation de l'aléa climatique. Dans ce qui suit, lorsqu'on parlera de décisions de long terme de l'agriculteur, il s'agira donc du choix inter-annuel de système de culture.

Les questions qui sont alors au cœur des simulations économiques que nous allons présenter sont, d'une part, d'estimer le coût pour l'agriculteur représentatif des épisodes de sécheresse et d'autre part, de déterminer si les décisions de court et/ou de long terme de l'agriculteur permettent d'atténuer ou

non de manière significative ce coût. Autrement dit, au delà d'une estimation du coût pour l'agriculteur de la sécheresse, le problème qui nous intéresse est de savoir si des décisions de court terme (choix de tactique d'irrigation) sont suffisantes ou pas pour limiter l'impact de la sécheresse.

2.2. La fonction objectif de l'agriculteur

On suppose que l'agriculteur connaît la relation qui existe entre ses variables de décision à court et à long terme et le niveau de production final (en d'autre terme, il connaît sa fonction de production), qui dépend également de la réalisation de l'aléa climatique³. Ainsi l'agriculteur est à même de calculer pour toute décision, qu'il peut éventuellement prendre, le profit qui en résulte, étant donné la réalisation de l'aléa climatique. Le profit annuel est ici simplement défini comme la somme des recettes (valeur de la production augmentée des primes compensatoires) diminuée de la somme des coûts de production (charges d'exploitation augmentées des coûts fixes spécifiques à chaque système de culture).

Une question importante en terme de modélisation consiste alors à caractériser la fonction objectif de l'agriculteur, c'est-à-dire l'objectif qu'il va chercher à maximiser par rapport à ses décisions de court et de long terme.

En univers certain, c'est-à-dire dans un monde où l'agriculteur connaît les réalisations à venir de l'aléa climatique, le problème de son aversion au risque (c'est-à-dire la propension que peut avoir l'agriculteur à préférer des décisions "moins rentables" à condition qu'elles réduisent son exposition au risque) ne se pose pas. L'hypothèse de recherche d'un profit maximal par l'agriculteur peut alors être tout à fait admise comme élément structurant d'un modèle d'optimisation du comportement de l'agriculteur.

Mais c'est en univers incertain que l'agriculteur doit prendre des décisions permettant de limiter ou d'atténuer le coût de la sécheresse. Lorsque l'agriculteur décide à un instant donné de la dose d'eau à apporter ou non à une culture, il met en balance le gain immédiat que pourrait procurer cet apport en eau (gain de croissance de la culture) avec la perte future liée au risque de manquer d'eau plus tard, en cas d'épisode de sécheresse (perte de croissance de la culture liée à un stress hydrique). Un agriculteur très averse au risque aura tendance à adopter un comportement plus conservateur en terme d'utilisation de l'eau en début de campagne, au risque de valoriser faiblement cette eau en fin de campagne d'irrigation dans le cas où aucune sécheresse ne se produit. De même, un agriculteur très averse au risque préférera opter pour des systèmes de culture peut-être moins rentables en moyenne mais moins sensibles dans le cas de réalisations de sécheresses. Notons également qu'il est évident que l'efficacité de l'eau d'irrigation est plus faible en univers incertain qu'en univers certain puisque certains choix qui pouvaient apparaître comme optimaux ex-ante ne le seront pas ex-post, c'est-à-dire après réalisation de l'aléa.

En univers incertain, supposer que l'agriculteur cherche à maximiser l'espérance de son profit consiste à faire implicitement une hypothèse de neutralité des agriculteurs vis-à-vis du risque climatique, hypothèse clairement rejetée par la plupart des études empiriques existantes. Par exemple, Belhaj Hassine et Thomas (2001) estiment un coefficient d'aversion au risque égal à 0.314 dans le cas d'irrigants tunisiens. Ce coefficient est significativement différent de 1, niveau qui correspond à l'hypothèse de neutralité au risque. Groom et al. (2006), sur des données de céréaliers chypriotes, trouvent une estimation du coefficient d'Arrow-Pratt relativement proche, égale à 0.340.

Une manière de prendre en compte l'aversion au risque de l'agriculteur consiste à supposer qu'il cherche non pas à maximiser son espérance de profit mais son espérance d'utilité du profit. C'est le cadre axiomatique de maximisation de l'espérance d'utilité initialement proposé par Von Neuman et Morgenstern (1944), couramment utilisé en économie du risque et de l'incertain, et que nous allons adopter. La fonction d'utilité reflète alors les préférences de l'agent et ses attitudes face à une situation risquée. Plus concrètement, le degré d'aversion au risque de l'agriculteur est mesuré par le niveau de

3. Il s'agit là d'une hypothèse faite dans la plupart des modèles économiques décrivant le comportement d'optimisation d'un agriculteur, voir Howitt (1995-a) ou bien Howitt (1995-b).

concavité de la fonction d'utilité, plus la fonction d'utilité de l'agriculteur est concave plus son niveau d'aversion au risque est élevé. La fonction d'utilité du profit retiré par l'agriculteur est notée $U(.)$ (voir en annexe 1 la présentation technique du modèle économique). Pour conclure, cette fonction d'utilité est donc supposée croissante et concave avec le profit dans le reste de cette étude.

2.3. Le problème d'optimisation de l'agriculteur

Le problème de l'agriculteur consiste alors à allouer sa SAU aux différents systèmes de culture possibles (choix de long terme) et à choisir des tactiques d'irrigation pour chaque système de culture (choix de court terme) de manière à maximiser sa fonction objectif c'est-à-dire l'espérance d'utilité de son profit⁴. Le modèle d'optimisation des décisions de l'agriculteur est décrit de manière beaucoup plus formelle en annexe 1.

3. Le modèle empirique pour la région Midi-Pyrénées

Dans ce qui suit, nous présentons le modèle empirique d'optimisation de l'agriculteur représentatif de la région Midi-Pyrénées en faisant la distinction entre ses choix de court terme (tactique d'irrigation) et ses choix de long terme (part de surface à allouer aux différents systèmes de culture).

3.1. La limitation de l'espace des décisions possibles

Il est clair que l'on doit limiter le nombre de décisions que peut prendre l'agriculteur de manière à ce que le modèle puisse être résolu par optimisation numérique. Nous détaillons maintenant les limitations que nous avons imposées aux espaces des décisions possibles à long terme (choix entre systèmes de culture) et à court terme (choix de tactique d'irrigation pour chaque système de culture).

Espace des décisions de long terme : choix de systèmes de culture possible

Nous avons limité le nombre de systèmes de culture pouvant être utilisés par l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées à 3. Pour la région Midi-Pyrénées, nous avons donc considéré les 3 systèmes de cultures (A, B, C) définis dans la section précédente de ce chapitre. 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. 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.

Espace des décisions de court terme : choix des tactiques d'irrigation

Pour les cultures associées à chaque système de culture, l'agriculteur peut opter chaque année pour une tactique d'irrigation. Etant donné les choix de long terme de systèmes de culture, la question que l'on cherche à étudier ici est de savoir si la flexibilité offerte à court terme par le choix de tactique d'irrigation permet de réduire le coût, pour l'agriculteur, des épisodes de sécheresse. Nous définissons de manière formelle une tactique d'irrigation de la manière suivante.

Définition : Une tactique d'irrigation est un vecteur d'apports d'eau à différentes dates de la campagne d'irrigation. Dans ce qui suit, on limite le nombre de dates potentielles d'apports en eau à 12, dates que l'on indice par p , $p \in \{1, \dots, 12\}$.

4. Comme on l'a mentionné précédemment, le choix de système 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 lourds. Au contraire, le choix de la tactique d'irrigation est un choix de court terme qui dépend des conditions climatiques au cours de chaque année. Autrement dit, le choix d'allocation de la SAU entre les systèmes de culture possibles est un choix inter-annuel (on recherche une allocation stationnaire qui ne varie pas avec l'année) alors que le choix de tactiques d'irrigation est une décision intra-annuelle qui varie d'année en année en fonction de la réalisation du climat, notamment.

L'agriculteur dispose donc de 12 dates réparties de manière uniforme tout au long de sa campagne d'irrigation, dates auxquelles il peut choisir d'apporter ou non à chaque culture une dose d'eau prédéfinie. Dans le cas où l'agriculteur a le choix entre 2 doses à chaque date, le nombre de tactiques d'irrigation s'élève déjà à $2^{12} = 4096$. Nous détaillons de manière plus précise les tactiques d'irrigation possibles pour les systèmes de culture A, B et C décrit dans Brisson et al. (2006), voir Annexe 2.

- Pour le système de culture A, nous considérons que l'agriculteur peut apporter à chacune des 12 dates possibles une dose de 30 mm d'eau par hectare avec un cumul maximum de 300 mm sur l'ensemble de la saison d'irrigation. On note $WAT_s^A \in]0, 30]$ la s-ième tactique du système de culture A. Par définition, l'ensemble des tactiques possibles est défini par :

$$WAT_s^A(p) \in]0, 30] \text{ et } \sum_{p=1}^{12} WAT_s^A(p) \leq 300$$

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

$$WAT_s^A(p) \in]0, 30] \text{ et } \sum_{p=1}^{12} WAT_s^A(p) \leq 120$$

Le nombre de tactiques d'irrigation considérées pour le système de culture B est donc 794.

- Le système de culture C correspond à des cultures en sec (blé dur et tournesol). Il n'y a donc pas de tactique d'irrigation associée à cette culture.

3.2. 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 tactique 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 agronomique STICS développée par J.C. Poupa (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).

Nous ne présentons ici que très brièvement le paramétrage du modèle agronomique STICS puisque nous avons repris les fichiers d'entrée présentés dans l'étude de Brisson et al. (2006). En particulier, les fichiers climat, itinéraire technique, sols et plante nécessaires aux simulations de STICS correspondent aux fichiers utilisés dans cette étude, à l'exception des tactiques d'irrigation.

Pour chaque système de culture, chaque culture, chaque type de sol, chaque année et chaque tactique d'irrigation possible, STICS fournit le rendement (kg/ha) de la culture considérée. Par exemple, si l'on s'intéresse au système de culture A (monoculture de maïs), pour un sol donné on doit effectuer 134739 simulations de STICS qui correspondent aux résultats des 4083 tactiques d'irrigation possibles pendant les 33 années d'historique (1972 à 2005).

3.3. La distribution de l'aléa climatique

Dans ce qui précède, nous avons indiqué que l'agriculteur maximise 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.

Nous disposons de 33 années d'historique (1972 à 2005) pour lesquelles on observe les caractéristiques climatiques de l'année (ETP, rayonnement, pluie...) à un pas de temps journalier. On considère que chaque année climatique observée est équiprobable et on affecte donc à chacune d'elle dans la fonction objectif un poids égal à 1/33.

On peut cependant penser que le réchauffement climatique va se traduire par une augmentation de la fréquence de réalisation des années "sèches" et on peut alors s'interroger sur l'impact de cette augmentation sur les comportements et la fonction objectif de l'agriculteur. La méthode consistera à modifier les probabilités associées aux années climatiques en attribuant un poids plus important aux années de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003 et 2005) puis à résoudre le programme d'optimisation de l'agriculteur.

3.4. Le 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 Régionale d'Agriculture de Midi-Pyrénées (CRA-MP).

La calibration du modèle sur l'année 2000-2001

Le modèle économique a été calibré (paramétrage des coûts de production, des prix des produits...) sur l'année 2000-2001. Ce choix résulte de deux raisons principales. D'abord, il s'agit de la dernière année pour laquelle il est possible de connaître, via les données du modèle SICOMORE de la CRA-MP, 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 sèche.⁵

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 2000-01⁶. On obtient pour l'année 2000-01, 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%.

Les données de prix et de coût de production

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 2000-01.

Il convient de relever que les données de coût de production par culture de la CRA-MP, $C^K(t)$, correspondent aux coûts variables uniquement (c'est-à-dire aux charges d'approvisionnement qui incluent les dépenses d'engrais, de semences, de produits phytosanitaires, d'assurance grêle ainsi que les différentes taxes sur la culture et les frais de récolte). Les dépenses en eau fournies par les fiches production du modèle SICOMORE de la CRA-MP correspondent à un prix unitaire de 0.64 euro par mm/ha, soit 0.064 euros par mètre cube. C'est le prix que nous retiendrons dans ce qui suit.

Les coûts spécifiques à chaque système de culture, C^K , ont été calibrés de manière à ce que le programme d'optimisation de l'agriculture ait pour optimum libre l'allocation des surfaces entre

⁵ Se faisant, on se place dans un contexte de mesures PAC avant réforme 2003.

⁶ Nous ne disposons au niveau de la région Midi-Pyrénées que des données de surface par culture et non pas 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 surface 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 2000-01 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.

systèmes de culture observée en 2000-01⁷. Le principe de ce calibrage consiste à résoudre le programme d'optimisation de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées en contraignant les parts de surface allouées aux systèmes de culture A, B et C à être égales à celles observées. Les variables duales associées à ces contraintes nous donnent alors les coûts spécifiques devant être associés à chaque système de culture, coûts que l'on intègre alors dans la fonction objectif de l'agriculteur.

Tableau 1. Paramétrage du modèle économique pour la région Midi-Pyrénées pour l'année 2000/2001 par type de sol et système de culture

		A		B				C		
		Maïs		Blé dur – Blé dur – Sorgho		Blé dur – Tournesol				
Unité		Maïs		Blé dur		Sorgho		Blé dur – Tournesol		
		irrigué	sec	irrigué	sec	irrigué	sec	Blé dur	Tournesol	
								sec	Sec	
Sol Type 1	Prix du produit, $p^K(t)$	Euros/kg	0.1188	0.1188	0.1263	0.1263	0.0963	0.0963	0.1263	0.2665
	Prime, $PAC^K(t)$	Euros/ha	448.17	300.3	643.45	643.45	448.17	300.3	643.45	342.53
	Coût variable, $C^K(t)$	Euros/ha	650.1	459.6	585.95	489.16	441.2	259.0	489.16	224.54
	Coût fixe par SdC, C^K	--	Endogène au modèle							
Sol Type 2	Prix du produit, $p^K(t)$	Euros/kg	0.1188	0.1188	0.1263	0.1263	0.0963	0.0963	0.1263	0.2665
	Prime, $PAC^K(t)$	Euros/ha	448.17	300.3	643.45	643.45	448.17	300.3	643.45	342.53
	Coût variable, $C^K(t)$	Euros/ha	698.3	459.6	585.95	489.16	441.2	309.29	489.16	293.14
	Coût fixe par SdC, C^K	--	Endogène au modèle							
Sol Type 3	Prix du produit, $p^K(t)$	Euros/kg	0.1188	0.1188	0.1263	0.1263	0.0963	0.0963	0.1263	0.2665
	Prime, $PAC^K(t)$	Euros/ha	448.17	300.3	643.45	643.45	448.17	300.3	643.45	342.53
	Coût variable, $C^K(t)$	Euros/ha	729.88	516.58	585.95	489.16	441.16	368.29	489.16	418.29
	Coût fixe par SdC, C^K	--	Endogène au modèle							

Source : les valeurs reportées ont été calculées à partir des fiches production du modèle SICOMORE développé par la Chambre d'agriculture de Midi-Pyrénées.

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 productions (systèmes de culture, itinéraires techniques...). Cette connaissance imparfaite du futur (par exemple des précipitations à venir ou bien d'éventuelles restrictions d'irrigation en cas de sécheresse) confère à leurs revenus un caractère incertain. Tous les agriculteurs n'ont alors pas les mêmes comportements vis-à-vis de la gestion de ce risque. Les goûts des agriculteurs sont en général représentés par leurs préférences et donc par leur fonction d'utilité (fonction $U(.)$ dans les programmes P_{2a} , P_{2b} en annexe). La fonction d'utilité reflète les préférences de l'agent et ses attitudes face à une situation risquée. Elle permet de ramener l'étude des décisions individuelles rationnelles à des programmes de maximisation sous contraintes.

Nous avons retenu une fonction d'utilité avec aversion relative pour le risque constante car c'est, d'une part, une forme fonctionnelle très couramment utilisée en économie de l'incertain et, d'autre part, une forme dont les paramètres s'interprètent très aisément. L'utilité que retire l'agriculteur d'un profit Π s'écrit :

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

⁷ En ce sens, notre approche est, dans un premier temps, de nature positive et non pas normative. Le paramètre de coût spécifique à chaque culture est calibré de manière à ce que l'allocation observée au niveau régional corresponde à un optimum pour l'agriculteur. Dans l'esprit on se rapproche d'un modèle de programmation positive du type de ceux développés dans Howitt (1995-a) ou Howitt (1995-b).

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.

Il n'existe pas à notre connaissance de travaux publiés sur l'estimation de l'aversion au risque des producteurs faisant intervenir l'eau d'irrigation, en France. Les travaux les plus proches sont, soit sur le cas français mais n'incluent pas l'eau d'irrigation dans la liste de leurs intrants, soit sur des pays étrangers. Par exemple, Belhaj Hassine et Thomas (2001) estiment le coefficient d'Arrow-Pratt à 0.314 dans le cas d'irrigants tunisiens. Groom et al. (2006), sur des données de céréaliers chypriotes, trouvent une estimation du coefficient d'Arrow-Pratt égale à 0.340.

Dans l'application du modèle au cas de la région Midi-Pyrénées, nous avons choisi un coefficient d'aversion au risque égal à 0.2. Des exercices de statique comparative seront conduits de manière à tester la stabilité des résultats obtenus au choix du coefficient d'aversion au risque.

4. Les résultats du modèle économique – cadre standard

4.1. Les résultats du modèle d'optimisation économique

Nous présentons, dans le tableau 2, le résultat des simulations économiques dans le cadre standard pour les 3 sols représentatifs de Midi-Pyrénées. Nous rappelons que, dans le tableau suivant, les niveaux d'irrigation correspondent aux niveaux optimisés par l'agriculteur étant donnés les prix des cultures, les coûts unitaires de production, la distribution de l'aléa climatique, etc.

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

Tableau 2 : Les résultats du modèle de base

Systèmes de culture		1972-2005			Années sèches ^a		
		A	B	C	A	B	C
Type sol 1	Marge Brute (euros/ha)	472.3	669.5	595.3	436.7 -7.5%	612.5 -8.5%	532.5 -10.6%
	Irrigation (mm/ha)	134.6	10.3	--	210 +56.0%	12 +16.5%	--
Type sol 2	Marge Brute (euros/ha)	917.4	725.3	746.7	628.6 -31.5%	725.8 +0.1%	664.48 -11.0%
	Irrigation (mm/ha)	157.7	12	--	246 +56.0%	12 +0.0%	--
Type sol 3	Marge Brute (euros/ha)	932.0	742.1	778.1	718.1 -23.0%	702.5 -5.3%	675.8 -13.1%
	Irrigation (mm/ha)	145.7	10.3	--	282 +93.5%	10 -2.9%	--

^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 *Années 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.

- Une sensibilité importante des résultats au type de sol

Tout d'abord, le type de sol a un impact très important sur la marge brute associée à chaque système de culture. C'est en particulier vrai 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.

- *Une sensibilité forte de la marge brute du système de culture A à l'impact de la sécheresse*

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. La figure 1 donne la moyenne des marges brutes optimisées par système de culture (A, B, et C) et par type de sol (1, 2 et 3) sur l'ensemble des années de 1972 à 2005 et sur les années de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003, 2005).

En terme 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 types 1 et 3, la perte en marge brute lors des années de sécheresse représente respectivement 8.5% et 5.3%.

- *Une irrigation importante du système de culture A en cas de sécheresse... qui peut être néanmoins réduite par l'outil tarifaire*

En terme 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 mm 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.

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 passe de 0.064 €/m³ à 0.128 €/m³), l'irrigation optimale moyenne en cas de sécheresse devient égale à 210 mm contre 282 mm 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 ici importante puisqu'elle représente une augmentation de 50% des dépenses opérationnelles en eau.

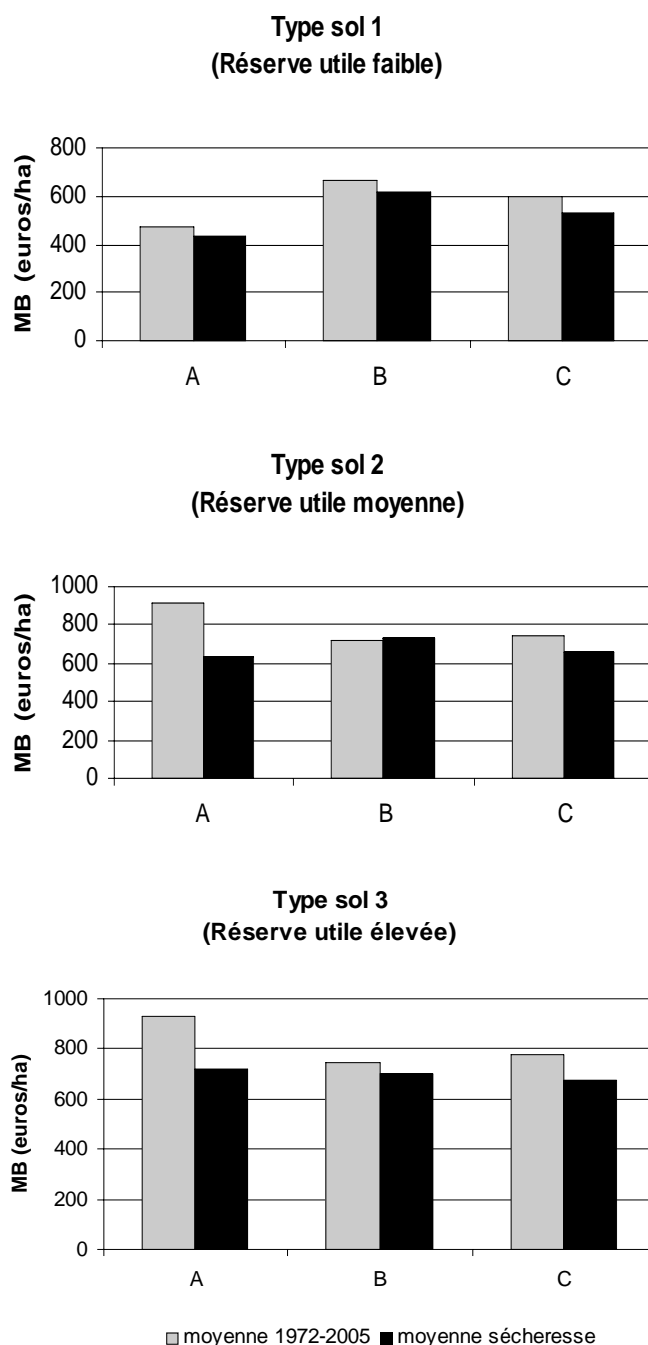
- *Synthèse des résultats dans le cadre standard*

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 3 sols* – ;
- très modéré dans le cas d'un système de culture B – *perte de marge brute de 4.6% en moyenne pour les 3 sols* – ;
- relativement important dans le cas d'un système de culture C – *perte de marge brute de 11.6% en moyenne pour les 3 sols* –.

Figure 1. Moyenne des marges brutes optimisées par système de culture sur l'ensemble des années et sur les années de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003, 2005).

Source : calcul de l'auteur à partir des sorties du modèle économique



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 mm 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, une valeur très proche de la limite 300 mm⁸. Il est donc vraisemblable que lors de certaines années sèches, l'agriculteur vienne heurter cette contrainte de 300 mm.

⁸ Nous rappelons que nous avons limité les tactiques d'irrigation possibles pour le système de culture A à celles dont le cumul annuel est inférieur à 300 mm (valeur déjà largement supérieure à la moyenne régionale).

Cela signifie que la perte de marge brute du système de culture A en cas de sécheresse résulte de 2 effets conjoints : des conditions climatiques vraisemblablement particulières mais aussi une contrainte 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 serait bien moindre, et les niveaux optimaux d'irrigation beaucoup plus élevés.

4.2. Sensibilité des résultats à des chocs sur les prix des produits

Dans un premier temps, nous pouvons nous interroger quant à la sensibilité des marges brutes optimisées par rapport à des variations du prix des produits (prix du maïs, du blé dur, du sorgho et du tournesol). La question que l'on se pose est donc de déterminer comment les marges brutes par système de culture évoluent lorsque le prix des produits augmente ou bien baisse⁹.

Pour ce faire, le modèle économique a été simulé avec des changements de prix des cultures (de +10% ou -10%). Le tableau 3 présente les résultats obtenus par type de sol et par système de culture.

Tableau 3. Impact du prix des cultures sur la marge brute et sur le niveau optimal d'irrigation

	Systèmes de culture	Variation des prix	Variation de la marge brute moyenne		Variation du niveau d'irrigation moyen	
			1972-2005	Année sèche	1972-2005	Année sèche
Type sol 1	A	+10%	+16.0%	+17.7%	0%	0%
		-10%	-16.2%	-17.8%	-3.4%	-5.7%
	B	+10%	+8.1%	+8.2%	0%	0%
		-10%	-8.3%	-8.2%	-50.5%	0%
	C	+10%	+8.0%	+8.0%	--	--
		-10%	-8.1%	-8.2%	--	--
Type sol 2	A	+10%	+13.8%	+16.5%	+2.7%	0%
		-10%	-13.9%	-16.7%	0%	0%
	B	+10%	+8.1%	+8.2%	0%	0%
		-10%	-8.7%	-8.2%	-50%	0%
	C	+10%	+8.9%	+9.1%	--	--
		-10%	-8.9%	-9.3%	--	--
Type sol 3	A	+10%	+14.0%	+16.4%	+1.2%	0%
		-10%	-14.0%	-16.4%	-0.6%	0%
	B	+10%	+8.4%	+8.4%	+0.0%	+20%
		-10%	-8.3%	-8.4%	-33.4%	+20%
	C	+10%	+9.7%	+10.3%	--	--
		-10%	-9.7%	-10.3%	--	--

Les données de ce tableau s'interprètent de la manière suivante.

Pour le sol de type 1, lorsque les prix des cultures du système de culture A (maïs) augmentent de 10%, la marge brute moyenne calculée sur l'ensemble des années augmente de 16.0% et la marge brute moyenne calculée sur les années de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003 et 2005) augmente de 17.7%.

Pour le sol de type 1, lorsque les prix des cultures du système de culture A (maïs) augmentent de 10%, le niveau moyen d'irrigation calculé sur l'ensemble des années augmente de 0% et le niveau moyen d'irrigation calculé sur les années de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003 et 2005) augmente de 0%.

Les principaux enseignements que l'on peut tirer de la lecture du tableau 3 sont les suivants :

- *Le système qui apparaît comme le plus sensible à des chocs exogènes sur le prix des cultures est le système de culture A (les variations de marge brute moyenne sont proportionnellement plus élevées pour le système de culture A que pour les 2 autres systèmes de culture).*
- *La variation de marge brute résultant d'un changement du prix des cultures ne dépend que très peu du type de sol.*

⁹ On peut par exemple penser qu'une augmentation importante du niveau de production d'une culture peut se traduire par une baisse du prix de cette culture si la fonction de demande est relativement inélastique.

- *La variation du niveau optimal d'irrigation résultant d'un changement du prix des cultures dépend du type de sol.* Par exemple, dans le système de culture B lorsque les prix baissent de 10% on observe une réduction moyenne du niveau d'irrigation de 50% pour les sols de type 1 et 2. Pour le sol de type 3, cette réduction n'est que de 33.4%.

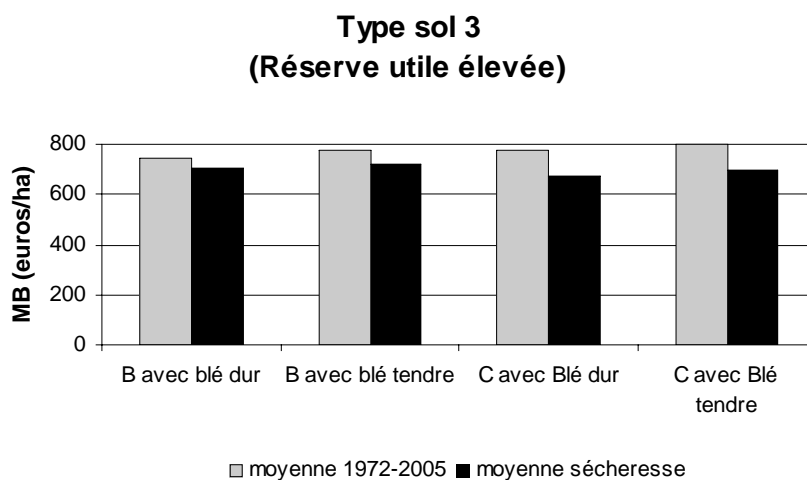
4.3. Sensibilité des résultats à des modifications de cultures

Selon les statistiques Agreste régionales 2005, le blé tendre représente plus du quart de la superficie consacrée aux céréales en Midi-Pyrénées. Il est donc important de tester la robustesse des résultats obtenus pour les 3 systèmes de culture précédents lorsque l'on introduit le blé tendre.

L'approche a consisté à remplacer dans les systèmes de culture B et C, le blé dur par du blé tendre. Ont ainsi été modifiés dans le programme d'optimisation de l'agriculteur le prix de vente du produit, le niveau de la prime compensatoire et le coût unitaire de production. Les données nécessaires à ces modifications proviennent des fiches SICOMORE de la CRA Midi-Pyrénées¹⁰. On suppose par contre que les rendements du blé dur et du blé tendre sont suffisamment proches pour être considérés comme identiques. Ainsi, pour le rendement obtenu pour du blé tendre, on utilise donc les sorties STICS avec les systèmes de culture initiaux A, B et C (qui incluent le blé dur). Dans ce qui suit, comparons les marges brutes optimisées en remplaçant le blé dur par du blé tendre dans les systèmes de culture B et C. Nous ne donnons que les résultats pour un sol de type 3, ceux obtenus pour les 2 autres sols étant sensiblement similaires.

Figure 2: Comparaison Blé dur / Blé tendre des moyennes des marges brutes optimisées par système de culture sur l'ensemble des années et sur les années de sécheresse.

Source : calcul de l'auteur à partir des sorties du modèle économique



On relève les résultats suivants :

- *Le passage du blé dur au blé tendre semble réduire de manière modérée les marges brutes associées aux systèmes de culture B et C, que ce soit en année moyenne ou en année de sécheresse.*
- *L'impact des années sèches (en terme de variation de la marge brute) est relativement similaire dans des systèmes avec blé dur et blé tendre.*

¹⁰ A titre de comparaison, pour le blé dur en sol profond (type 3), en 2000, le coût unitaire de production (hors dépenses en eau et coûts fixes) était de 585.95 euros par ha avec irrigation de complément et le prix de 0.1188 euros par kg. Pour le blé tendre, ces paramètres sont respectivement égaux à 396.79 euros par ha et 0.1182 euro par kg.

4.4. 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 celui de l'assurabilité d'un tel risque, voir par exemple le rapport de synthèse de l'ESCo sécheresse. 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'une assurance sécheresse.

Pour une présentation plus complète des concepts d'*équivalent certain* et de *prime de risque* (ainsi que leur calcul dans le modèle empirique), le lecteur intéressé pourra se reporter à l'annexe 3. 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.

Tableau 4. Mesure de la prime de risque (euros par ha) en fonction de la nature du sol et des préférences pour le risque de l'agriculteur représentatif

Type de sol	Préférences pour le risque	Coef. CRRA	Equivalent certain ^(a)	Prime de risque ^(a)
			Euros par ha	Euros par ha
Sol 1	Fortement averse au risque	2	286.97	24.17
	Modérément averse au risque	0.8	539.57	13.42
	Faiblement averse au risque	0.2	549.81	3.18
	Faiblement riscophile	-0.2	556.08	-3.08
	Modérément riscophile	-0.8	564.83	-11.83
	Fortement riscophile	-2	580.61	-27.62
Sol 2	Fortement averse au risque	2	503.15	30.84
	Modérément averse au risque	0.8	812.23	8.40
	Faiblement averse au risque	0.2	818.63	2.00
	Faiblement riscophile	-0.2	822.56	-1.93
	Modérément riscophile	-0.8	828.01	-7.39
	Fortement riscophile	-2	837.67	-17.05
Sol 3	Fortement averse au risque	2	575.08	31.26
	Modérément averse au risque	0.8	833.35	8.54
	Faiblement averse au risque	0.2	838.57	2.00
	Faiblement riscophile	-0.2	843.81	-1.91
	Modérément riscophile	-0.8	849.09	-7.20
	Fortement riscophile	-2	858.06	-16.17

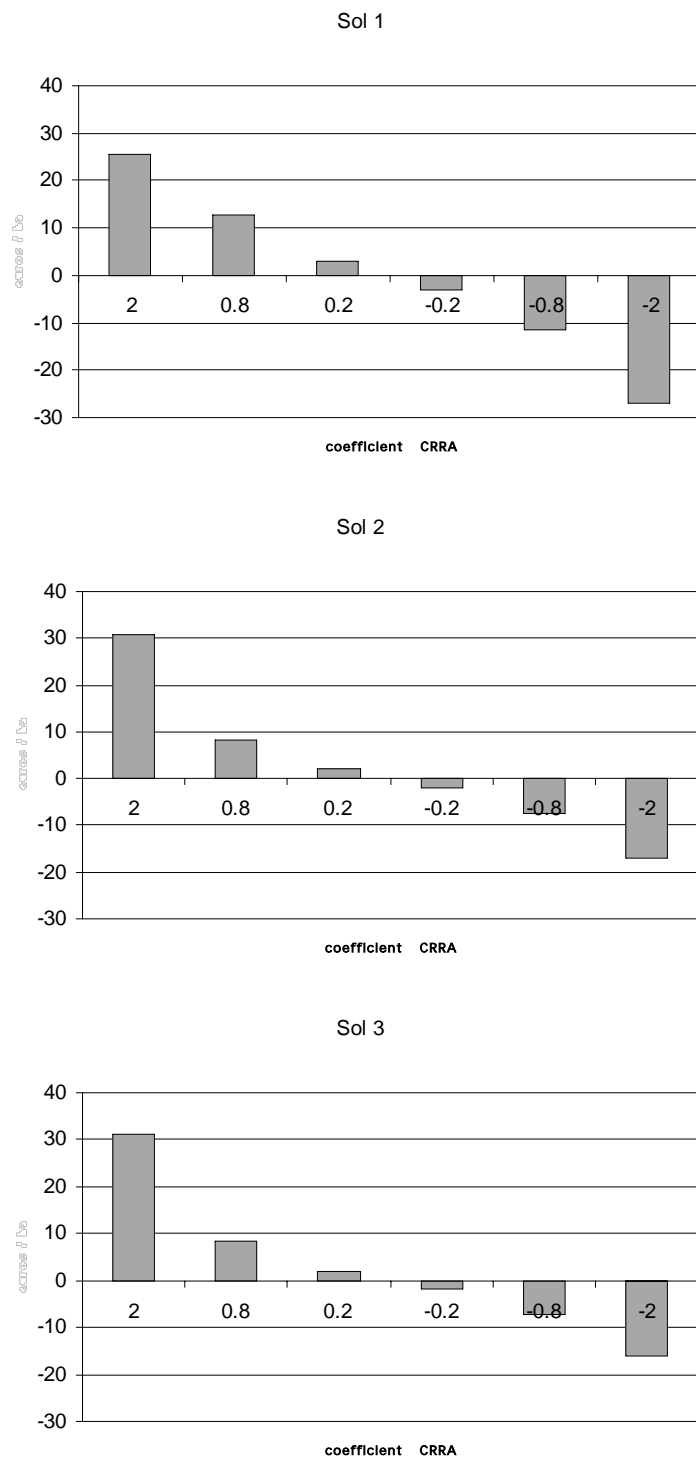
^(a) Les concepts d'*équivalent certain* et de *prime de risque* sont définis en annexe 3. On se borne ici à rappeler leur définition. L'équivalent certain du profit est le niveau certain de richesse permettant d'obtenir un niveau d'espérance d'utilité égal à celui de l'activité agricole soumise à l'aléa. La prime de risque est définie comme le montant monétaire que l'agriculteur est prêt à sacrifier pour éviter toute forme de risque.

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 et sa prime de risque à 24.17 euros par ha.

Dans le Tableau 4 et la Figure 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).

Figure 3. Prime de risque (euros par ha) en fonction de la nature du sol et des préférences pour le risque de l'agriculteur représentatif

Source : calcul de l'auteur à partir des sorties du modèle économique



Les principaux enseignements que l'on peut tirer du Tableau 4 et de la Figure 3 sont les suivants.

- *La prime de risque décroît avec le niveau d'aversion au risque.*

Il s'agit d'un résultat que l'on attendait, bien entendu. 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 qui aime fortement le risque ne sera prêt à recevoir de façon certaine l'espérance de son profit que si on le dédommage de 17.62 euros par ha. Mais comme le rappellent Hassine et Thomas (2001) ou Groom et al. (2006), les agriculteurs sont caractérisés par de l'aversion au risque et les primes de risque seront donc positives.

- *La 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 très 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 un peu moins de 4% de la marge brute moyenne. 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.

- *La nature des sols n'a un impact sur la prime de risque que pour des préférences vis-à-vis du risque extrême.*

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 3 sols considérés. Pour des préférences extrêmes, on constate des différences 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 moyennement profond (type 2).

Pour conclure, la mise en place de systèmes d'assurances sécheresse ne peut faire l'économie d'une analyse fine des préférences des agriculteurs tant ce paramètre semble avoir un impact important sur le niveau des primes de risque. Une différenciation des primes de risque en fonction de la nature du sol peut être envisagée dans le cas de préférences vis-à-vis du risque très marquées.

5. Les résultats du modèle économique – environnement modifié

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. Sauf mention contraire, 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 3 sont relativement proches de ceux obtenus pour le sol 3.

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_{2b} , présenté en annexe, 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 comportements et la fonction objectif de l'agriculteur.

Pour se faire, la méthode consiste à modifier les probabilités associées aux années climatiques en attribuant un poids plus important aux années de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003 et 2005) puis à résoudre le programme d'optimisation de l'agriculteur (P_1 , P_{2b}). 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.

Comme indiqué précédemment, nous allons distinguer 2 cas de figure qui permettent d'évaluer à court et à long terme l'impact de l'augmentation de la fréquence des sécheresses sur la fonction objectif de l'agriculteur :

- A court terme, l'agriculteur ne peut pas réallouer les parts de surface qui ont été allouées aux 3 systèmes de culture (A,B et C). Son unique moyen pour limiter l'impact de l'augmentation de la fréquence des sécheresses consiste donc à ré-optimiser ses tactiques d'irrigation, c'est-à-dire à modifier les dates et les quantités d'apports d'eau.
- A long terme, au contraire, l'agriculteur est capable de modifier ses choix de tactique d'irrigation mais aussi les parts de surface allouées aux 3 systèmes de culture. Il dispose donc d'une flexibilité plus importante à long terme qu'à court terme. On cherche donc à voir si cette flexibilité accrue se traduit de manière significative par des gains de fonction objectif.

Le tableau 5 et la figure 4 permettent de voir comment l'augmentation de la fréquence des années de sécheresse modifie les décisions de choix d'allocation de surface aux 3 systèmes de culture et de mesurer le coût pour l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées de cette augmentation en terme de perte de fonction objectif (mesurée en espérance d'utilité nette des coûts spécifiques à chaque système de culture).

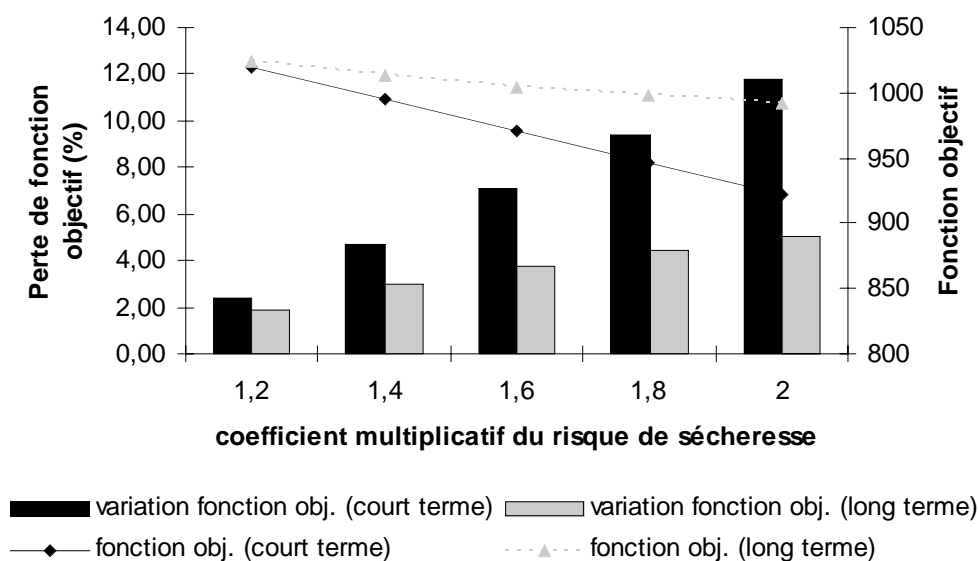
Tableau 5. Impact d'une augmentation de la fréquence des années de sécheresse sur le comportement et la fonction objectif de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées

Coefficient multiplicateur du risque de sécheresse	Caractéristiques de l'optimum			
	Court terme		Long terme	
	Systèmes de culture	Fonction objectif	Systèmes de culture	Fonction objectif
1	A : 0.459 B : 0.192 C : 0.349	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		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 les colonnes *Fonction objectif* 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.

Figure 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

Source : calcul de l'auteur à partir des sorties du modèle économique



Les principaux enseignements sont les suivants.

- *A court terme, le choix de tactique 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 tactique 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 tactique d'irrigation permettent de limiter l'impact d'une augmentation modérée de la fréquence des années sèches. Par contre, 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 tactique 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 tactique 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 tactiques 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).

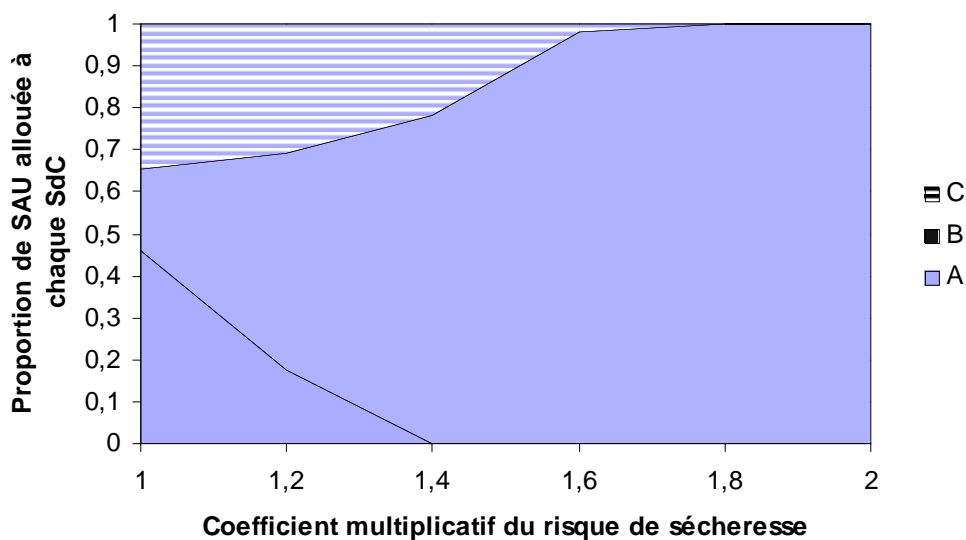
- *A long terme, une augmentation modérée de la fréquence des années sèches se traduit par une baisse de la SAU allouée au système de culture A au profit des systèmes de culture B et C. Lorsque la fréquence des années sèches devient très forte, le système de culture B tend à dominer les deux autres.*

On a vu dans le tableau 5 et sur la figure 4 que 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 de manière très sensible l'impact de l'augmentation de la fréquence des sécheresses sur la fonction objectif de l'agriculteur représentatif. La réponse est donnée par la figure 5. Lorsqu'on augmente modérément le risque de sécheresse (de 1 à 1.2), l'agriculteur augmente la proportion de surface allouée au système de culture B (qui résiste a priori mieux que les systèmes de culture A ou C au risque de sécheresse, voir les discussions dans la section 2 concernant les marges brutes par système de culture en cas d'année sèche). Au-delà d'un certain niveau de risque de sécheresse, 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.

Figure 5. Impact d'une augmentation de la fréquence des années de sécheresse sur l'allocation optimale de la SAU aux systèmes de culture (choix de long terme)

Source : calcul de l'auteur à partir des sorties du modèle économique



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 limitation quantitative des prélèvements en eau à usage agricole. On peut donc anticiper que les phénomènes de sécheresse soient de plus en plus accompagnés par des mesures, souvent administratives, de restriction des prélèvements agricoles en eau. Il est donc important pour la puissance publique d'évaluer les pertes (en terme de fonction objectif de l'agriculteur) induites par ce type de restrictions quantitatives.

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

$$\delta_s^K(t) > 0 \text{ si et seulement si } WAT_s^K \leq \overline{WAT}^K \text{ si } t \in \{\text{sécheresse}\}$$

ce qui signifie que la part de surface sur laquelle l'agriculteur utilise la tactique s dans le système de culture K au cours de l'année t de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003 et 2005) est strictement positive si et seulement si cette tactique correspond à un apport total en eau lors de la campagne d'irrigation inférieur à \overline{WAT}^K mm par ha. Autrement dit, les tactiques 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 impacte sur sa fonction objectif. Comme précédemment, on distingue l'approche de court terme et de long terme selon que l'agriculteur est capable ou non de réallouer ses parts de surface aux 3 systèmes de culture (A,B et C). Les résultats de ces simulations sont présentés dans le tableau 6.

Tableau 6. 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)			Caractéristiques de l'optimum					
			Court terme			Long terme		
			Systèmes de culture	Fonction objectif	Systèmes de culture			Fonction objectif
A	B	C			A	B	C	
300	120	0	A : 0.459 B : 0.192 C : 0.349	1044.65	0.459	0.192	0.349	1044.65
270	90	0		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%)

Note : les valeurs entre parenthèses dans les colonnes *Fonction objectif* donnent le pourcentage de perte de fonction objectif par rapport au cas initial (300 mm pour A, 120 mm 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.

- *A court terme, le changement de tactiques d'irrigation permet à l'agriculteur de limiter l'impact sur la fonction objectif des limitation du niveau maximal d'irrigation.*

Par exemple, lorsque le niveau maximal d'irrigation en cas de sécheresse passe de 300 mm à 240 mm pour le système de culture A et de 120 mm à 60 mm pour le système de culture B, la perte de fonction objectif 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 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) sont de plus en plus fortes, augmenter les surfaces à allouer au système de culture B semble émerger comme une stratégie dominante.*

5.2. Impact des interdictions d'irriguer en période d'étiage lors des années de "sécheresse" avec ou sans anticipation des agriculteurs

Les sécheresses récentes les plus sévères ont souvent été accompagnées par les autorités publiques par la mise en place d'interdictions d'irrigation lors des périodes les plus critiques. On peut alors

légitimement s'interroger sur le coût pour l'agriculteur induit par ces restrictions, ainsi que sur les moyens dont il dispose, à court et à long terme, pour limiter ce coût.

On introduit maintenant dans le programme d'optimisation P_1 des contraintes d'interdiction d'irriguer à certaines périodes en cas de sécheresse. Typiquement, le type de contrainte que l'on impose s'écrit :

$$\delta_s^K(t) > 0 \quad \text{si et seulement si} \quad WAT_s^K(p) = 0 \quad \text{pour } p \in \{T - h, \dots, T\} \text{ et } t \in \{\text{sécheresse}\}$$

ce qui signifie que la part de surface sur laquelle l'agriculteur utilise la tactique s dans le système de culture K au cours de l'année t est strictement positive si et seulement si cette tactique ne nécessite aucune irrigation pendant les h dernières périodes de la campagne d'irrigation et si l'année est une 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 sa fonction objectif. Plus concrètement, on rappelle qu'une tactique d'irrigation est ici 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 période 9 à 12. Pour les autres périodes (1 à 8), l'agriculteur ne fait face à aucune contrainte de limitation en eau.

L'impact d'une contrainte d'interdiction d'irriguer à certaines périodes en cas de sécheresse va dépendre de manière substantielle des possibilités d'adaptation de l'agriculteur. Ici encore, on va distinguer les solutions de court terme de l'agriculteur (changement de ses tactiques d'irrigation) de ses décisions de long terme pour lesquelles l'agriculteur est en plus capable de réallouer ses surfaces entre systèmes de culture (choix inter-annuel de long terme).

a) Les résultats à court terme

À court terme, l'agriculteur ne peut modifier que ses tactiques d'irrigation. L'impact des interdictions d'irrigation va alors dépendre de la faculté qu'il a d'anticiper ou non ces interdictions. Dans le tableau 5 et la figure 5, 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 tactiques 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 tactiques d'irrigation sont importantes et plus la perte de fonction objectif sera faible.
- Le cas "interdictions *non anticipées*" correspond à une situation extrême où l'agriculteur apprend en début de période 9 qu'il lui est interdit d'irriguer pour les 4 dernière périodes. Il n'a donc aucune possibilité de ré-optimisation de ses tactiques d'irrigation. La perte en terme de fonction objectif est donc maximale.

Les résultats des simulations sont présentés dans le tableau 7 et la figure 6. Les principaux enseignements que l'on peut tirer 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 de manière à ré-optimiser ses tactiques d'irrigation sous la contrainte de non-

irrigation en période d'étiage, la perte en terme 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. Par contre 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. On peut alors s'attendre à des pics de consommation en eau puisque les agriculteurs auront recours à l'irrigation lors des périodes 6 et 7.

- *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 système de culture et anticiper les contraintes de non-irrigation en période d'étiage, la perte de fonction objectif est très importante (-53.82%). Ce résultats suggère 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 permet de réduire de manière considérable le coût de l'interdiction d'irrigation pour l'agriculteur.

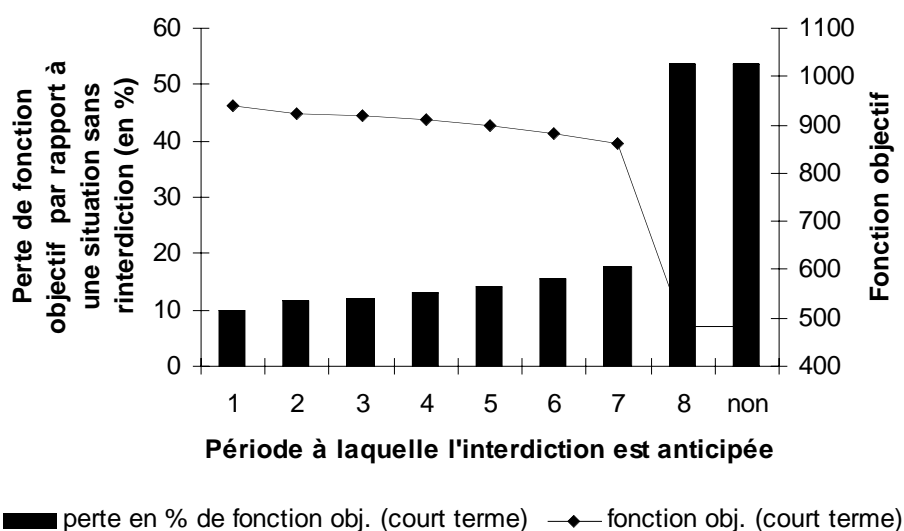
Tableau 7. Impact des interdictions d'irriguer sur la fonction objectif de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées (choix de court terme)

		Fonction objectif
Pas d'interdiction d'irriguer		1044.65
Interdictions <i>anticipées</i>	Date à laquelle l'interdiction est anticipée	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 <i>non-anticipées</i>		482.43 (-53.82%)

Note : les valeurs entre parenthèses dans la colonne Fonction objectif donnent le pourcentage de perte de fonction objectif par rapport au cas sans restrictions d'irrigation.

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

Source : calcul de l'auteur à partir des sorties du modèle économique



b) Les résultats à long terme

A long terme, l'agriculteur peut 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. Il peut bien entendu toujours modifier ses tactiques d'irrigation, lorsqu'il anticipe l'interdiction à venir.

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 égal à 1044.65 (pas d'unité car espérance d'utilité) et les parts de surface allouées aux systèmes de culture A, B et C sont respectivement égales 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 (périodes 9-12) dans le cas d'années de sécheresse (1976, 1989, 1990, 2003 et 2005).

Il est possible que, même à long terme, les possibilités de ré-allocation 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 ré-allocation des surfaces aux systèmes de culture par rapport à l'optimum sans interdiction d'irriguer. De façon plus précise, on va dans certains cas 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 surfaces 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 8 et la figure 7. Les principaux enseignements que l'on peut tirer sont les suivants.

- 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.
- A long terme (l'agriculteur est capable de réallouer ses surfaces entre les trois systèmes de culture) et sans contrainte sur les possibilités de ré-allocation des surfaces aux systèmes de culture, la perte

résultant des interdictions d'irriguer lors des périodes d'étiage, perte mesurée en terme de fonction objectif de l'agriculteur, est modérée (-1.87%) que l'agriculteur anticipe ces interdictions dès la première période ou non.

Tableau 8. 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 au système de culture			Fonction obj. ^(b)	
			A	B	C		
Pas d'interdiction d'irriguer	--	non	0.459	0.192	0.349	1044.65	
Interdictions <i>anticipées</i>	Date à laquelle l'interdiction est anticipée	1	non	0.000	0.991	0.009	1025.10 (-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	1025.10 (-1.87%)
		7	oui	0.368	0.230	0.402	889.05 (-14.89%)
Interdiction <i>non-anticipées</i>		non	0.000	0.991	0.009	1025.10 (-1.87%)	
		oui	0.368	0.230	0.402	495.94 (-52.52%)	

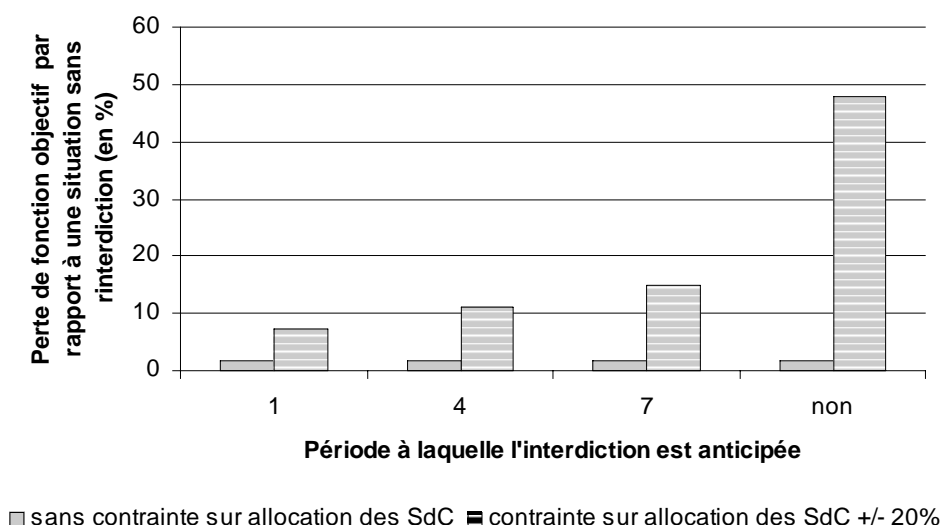
Notes :

^(a) "non" correspond à la situation où aucune contrainte sur la ré-allocation 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 la colonne Fonction obj. donnent le pourcentage de perte de fonction objectif par rapport au cas sans restrictions d'irrigation.

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

Source : calcul de l'auteur à partir des sorties du modèle économique



□ sans contrainte sur allocation des SdC ▨ contrainte sur allocation des SdC +/- 20%

- *A long terme, le fait de ne pas pouvoir réallouer librement les surfaces entre systèmes de culture a un impact sur la fonction objectif, modéré dans le cas où les restrictions sont anticipées (de -7.25% à -14.89%) et très négatif dans le cas où les restrictions ne sont pas anticipées (-52.82%).*
- *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. Remarques conclusives et discussion

Dans les paragraphes précédents, nous avons essayé d'appréhender l'impact de la sécheresse sur les décisions optimales de court terme (choix des tactiques d'irrigation) et de long terme (choix des systèmes de culture) de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées. Nous nous sommes également attachés à quantifier l'impact de la sécheresse sur la fonction objectif de cet l'agriculteur.

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.

6.1. Limites et hypothèses de modélisation

Avant de résumer les principaux résultats que nous avons obtenus, il convient de souligner un certain nombre d'hypothèses que nous avons été amenés à faire, ainsi que certaines limites de l'approche de couplage modèle biophysique / modèle économique développée ici.

Tout d'abord, les variables de décision de l'agriculteur se limitent ici aux tactiques d'irrigation et aux systèmes de culture. Dans la pratique, l'agriculteur dispose d'un panel de choix possibles beaucoup plus important. Ces choix non modélisés peuvent correspondre à des itinéraires techniques particuliers (choix de variétés précoces, changement de la date des semis, substitutions entre les différents facteurs de production, etc.), à des décisions d'investissement à long terme (développement de nouvelles capacités de stockage d'eau par exemple) ou bien à des tactiques de couverture contre le risque de sécheresse (recours à des formes d'assurance par exemple). Il est vraisemblable que dans un modèle qui intégrerait ces différents choix possibles, le coût pour l'agriculteur des sécheresses serait moindre.

Nous avons d'autre part supposé que l'agriculteur est capable de calculer, pour chaque année et chaque tactique d'irrigation possible, le rendement associé à chacune des cultures (à l'exception du paragraphe traitant des interdictions d'irriguer anticipées ou non par l'agriculteur). Cela signifie qu'au moment de choisir la tactique optimale d'irrigation pour une année donnée, l'agriculteur connaît l'ensemble des éléments qui vont affecter le rendement. Cela revient à faire une hypothèse forte d'anticipations rationnelles du climat. On sait que relâcher cette hypothèse se traduirait par une augmentation du coût pour l'agriculteur des sécheresses, toutes choses étant égales par ailleurs.

En terme de spécification de la fonction d'utilité de l'agriculteur, nous avons retenu une spécification de type CRRA en arguant du fait que c'est une forme fonctionnelle très couramment utilisée en économie de l'incertain dont les paramètres s'interprètent très aisément. Il est clair que des tests de spécification devraient être conduits. Des exercices de statique comparative sur le niveau du coefficient d'aversion au risque devraient être également réalisés.

D'un point de vue empirique, pour des raisons de temps et de contraintes matérielles nous avons limité l'analyse au cas de la région Midi-Pyrénées. Il est clair que l'étude des autres régions pilotes de l'étude de Brisson et al. permettrait d'apporter un éclairage intéressant sur l'impact de la sécheresse sur l'agriculture en France.

6.2. Quelques enseignements des simulations économiques

Sensibilité "économique" des systèmes de culture aux années sèches

Lorsqu'on s'intéresse uniquement à l'impact des années sèches sur la marge brute et sur les décisions d'irrigation de l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées, on constate *des niveaux de pertes importants dans le cas d'un système de culture A (monoculture de maïs), très modérés dans le cas d'un système de culture B (Blé dur – Blé dur – Sorgho) et relativement importants dans le cas d'un système de culture C (Blé dur – Tournesol)*. Une partie de la sensibilité économique du système de culture A s'explique par le fait qu'en année de sécheresse il nécessite des niveaux d'irrigation très élevés, souvent incompatibles avec la limitation du niveau d'irrigation à 300 mm que nous avons imposée a priori. Cette contrainte s'explique par le fait que l'on peut s'attendre à ce que, lors d'épisodes de sécheresse, les agriculteurs soient de plus en plus confrontés à des restrictions quantitatives d'irrigation. Il est important de l'intégrer dans une modélisation du comportement de l'agriculteur.

Assurance sécheresse et prime de risque

La mise en place de systèmes d'assurance sécheresse ne peut faire l'économie d'une analyse fine des préférences des agriculteurs tant ce paramètre semble avoir un impact important sur le niveau des primes de risque. Les primes de risque pour l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées sont estimées de quelques euros par hectare dans le cas d'une aversion au risque faible à plus de 30 euros par hectare pour un agriculteur fortement averse au risque. On a également montré qu'une différenciation des primes de risque en fonction de la nature du sol pourra être envisagée dans le cas de préférences vis-à-vis du risque très marquées.

Capacités d'adaptation de l'agriculteur face au risque de sécheresse, à court et à long terme

A court terme, c'est-à-dire à système de culture donné, il apparaît que les capacités d'adaptation des agriculteurs (via le choix des tactiques 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 (voir tableau 5). 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 comme 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 (voir les résultats du modèle économique – cadre standard).

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 d'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 culture sont possibles (5.08% contre 11.78%, voir tableau 5). La réallocation des surfaces entre systèmes de culture combinée aux ajustements intra-annuels de tactiques 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 (critère d'espérance d'utilité).

De l'importance pour l'agriculteur d'anticiper le risque de sécheresse et les interdictions d'irriguer à venir

On sait que l'impact du risque de sécheresse sur la fonction objectif de l'agriculteur dépend de manière cruciale des possibilités qu'il a d'anticiper, ou non, les éventuelles limitations ou interdictions d'irriguer dans le cas d'un épisode de sécheresse avéré. Le modèle économique que nous avons développé permet de déterminer le coût des sécheresses pour l'agriculteur en fonction de la date à

partir de laquelle il sait que l'irrigation en période d'étiage sera rationnée ou interdite. Cela permet à la puissance publique de mesurer les gains privés qui peuvent être associés à la mise en place de systèmes d'alerte précoce des sécheresses.

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 (voir tableau 7). 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 (voir tableau 7). Par contre, 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 ces interdictions dès la première période ou non (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 pour l'agriculteur mesurée en terme de fonction objectif représente 9.94% à court terme contre plus de 50% sans information (voir tableau 7). Ce résultat nécessite toutefois des travaux supplémentaires de validation.

En terme de recommandation de politique économique, ces résultats suggèrent qu'il est important pour le décideur public de faciliter les changements de système de culture, via la mise en place de mécanismes incitatifs, d'aide technique, 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 que la puissance publique peut se tromper en annonçant une sécheresse et que cette erreur d'annonce peut se traduire par un coût pour l'agriculture). De multiples pistes d'extensions du modèle présenté permettaient d'améliorer le modèle présenté dans cette étude.

6.3. Conclusion

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'agriculteur en France. Le modèle nous a en particulier permis de mesurer les marges de manœuvre dont dispose l'agriculteur à court et à long terme et de voir comment les anticipations des épisodes de sécheresse permettaient d'atténuer le coût de celles-ci pour l'agriculteur représentatif de Midi-Pyrénées.

Ce travail ouvre la porte à de multiples extensions qui nécessiteraient de plus amples travaux de recherche en économie agricole.

1. On pourrait tout d'abord s'intéresser aux systèmes de culture représentatifs des 9 autres régions pilotes de l'étude de Brisson et al. (2006). Cela permettrait d'avoir une vision plus complète de l'impact de la sécheresse au niveau français.
2. On pourrait ensuite travailler de manière beaucoup plus précise sur l'impact de l'aversion au risque de l'agriculteur sur ces décisions optimales, de court et de long terme.
3. On pourrait élargir dans le modèle d'optimisation les décisions que peut prendre l'agriculteur (tactiques d'irrigation et surfaces allouées aux systèmes de culture) à d'autres choix jugés

pertinents : modifications des dates de semis, décision d'investissement dans des ouvrages hydrauliques de type retenue collinaire, etc.

4. On pourrait s'intéresser de manière plus précise à la mise en place de mécanismes d'annonce précoce des sécheresses par la puissance publique et de définition de la date optimale d'annonce. Par exemple, on pourrait construire un modèle dans lequel la puissance publique annonce de manière précoce les sécheresses à venir, mais avec une certaine probabilité d'erreur. La date optimale d'annonce de la sécheresse par la puissance publique mettrait alors en balance le gain pour l'agriculteur résultant des adaptations en terme de stratégies d'irrigation rendues possibles par une annonce précoce de la sécheresse à venir avec la perte résultant d'un comportement trop précautionneux dans le cas où la sécheresse annoncée ne se produit pas.
5. On pourrait enfin étendre la mesure des primes de risque à des probabilités d'occurrence des sécheresses plus élevées de manière à évaluer la viabilité d'un système d'assurance dans un cadre de risque de sécheresse accru. D'une manière plus générale, la problématique de la mise en place d'assurances sécheresse nécessiterait d'approfondir certaines pistes de recherche qui n'ont pu être qu'effleurées dans le cadre de l'expertise scientifique collective "Sécheresse et agriculture" (préférences pour le risque, comportement d'auto-protection ou d'auto-assurance, etc.).

Références

- 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, 2001.
- Bouzaher A., Cae R., Johnson S., Manale A., Shogren F.J., 1995. CEEPES: An evolving system for agroenvironmental policy. Dans : *Integrating Economic and Ecological indicators. Practical Methods for Environmental Policy Analysis*. Chapter 5, Prager, 67-89.
- Brisson N., Huard F., Graux A.I., Lebas C. et P. Debaeke. 2006. Impacts de la variabilité des facteurs responsables de la sécheresse agricole à l'échelle du territoire par une approche de modélisation biophysique. Miméo INRA Avignon.
- 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., Musgrave W.F., 1971. "Optimal intraseasonal irrigation water allocation", *Water Resources Research*, 7(4), 770-788.
- Flichman G., Jacquet F., 2003. "Le couplage des modèles agronomiques et économiques : intérêt pour l'analyse des politiques", *Cahiers d'Economie et de Sociologie Rurales*, 67, 51-69.
- Groom B., Koundouri P., Nauges C., Thomas A., 2006. "The story of the moment: risk averse Cypriot farmers respond to drought management". *Applied Economics*, A paraître.
- Howitt R.E., 1995-a. Positive Mathematical Programming. *American Journal of Agricultural Economics* 77(2): 329-342.
- Howitt R.E., 1995-b. "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.
- Mapp H.P., Bernardo D. J., Sabbagh G.J., Geleta S., 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.
- Plantinga A., 1996. The Effect of Agricultural Policies on Land Use and Environmental Quality. *American Journal of Agricultural Economics* 78(November): 1033-1047.
- Poupa J.C., 2006. "Rétro-ingénierie de programmes Fortran . Application au modèle de simulation STICS", miméo INRA Rennes.
- Prato T., Fulcher C., Wu S., Ma J., 1996. Multiple-Objective Decision Making for Agro-ecosystem Management. *Agricultural and Resource Economics Review* 25(October): 200-212.
- Rao N.H., Sarma P.B.S., Chander S., 1990. "Optimal multicrop allocation of seasonal and intraseasonal water", *Water Resources Research*, 26(4), 551-559.
- Von Neuman J., Morgenstern O., 1944. *Theory of Games and Economic Behavior*, Princeton, University Press.
- Wu J., Segerson K., 1995. The Impact of policies and land CharacteriSTICS on Potential Groundwater Pollution in Wisconsin. *American Journal of Agricultural Economics*, 77(November): 1033-1047.
- Yaron D., Dinar A., 1982. "Optimal allocation of farm irrigation water during peak seasons", *American Journal of Agricultural Economics*, 64: 681-689.

Annexe 1. Ecriture formalisée du modèle d'optimisation économique du comportement de l'agriculteur

Le problème de l'agriculteur consiste à allouer sa SAU aux 3 systèmes de culture possibles, tout en optimisant le choix des tactiques d'irrigation.

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 pour le maïs irrigué qui peut nécessiter des équipements en irrigation lourds. Au contraire, le choix de la tactique d'irrigation est un choix de court terme qui dépend des conditions climatiques au cours de chaque année.

Autrement dit, le choix d'allocation de la SAU entre les 3 systèmes de culture possibles est un choix *inter-annuel* (on recherche une allocation stationnaire qui ne varie pas avec l'année) alors que le choix de tactiques d'irrigation est une décision *intra-annuelle* qui varie d'année en année en fonction de la réalisation du climat, notamment.

Dans ce qui suit, nous présentons le programme d'optimisation de l'agriculteur représentatif en faisant la distinction entre ses choix de court terme (tactique d'irrigation) et ses choix de long terme (parts de surface à allouer aux différents systèmes de culture).

Le choix intra-annuel des tactiques d'irrigation

Supposons dans un premier temps que l'agriculteur ait alloué une proportion $\delta^K \in [0,1]$ à chaque système de culture K , $K \in \{A,B,C\}$, avec bien entendu $\sum_{K \in \{A,B,C\}} \delta^K = 1$. La question consiste alors à

déterminer pour chaque système de culture et chaque année, les tactiques d'irrigation qui devront être utilisées, c'est-à-dire les tactiques qui maximisent la fonction objectif de l'agriculteur (marge brut totale, ici en l'occurrence).

Le problème P_I intra-annuel de l'agriculteur pour l'année t s'écrit :

$$\begin{aligned} & \text{Max}_{\left\{ \begin{array}{l} \delta_1^A(t), \dots, \delta_{S_A}^A(t), \dots, \delta_{S_A}^A(t) \\ \delta_1^B(t), \dots, \delta_{S_B}^B(t), \dots, \delta_{S_B}^B(t) \\ \delta_1^C(t), \dots, \delta_{S_C}^C(t), \dots, \delta_{S_C}^C(t) \end{array} \right\}} SAU \times \left\{ \sum_{s=1}^{S_K} \delta_s^K(t) \times \left[p^K(t) \times Y_s^K(t) + PAC^K(t) - C^K(t) - w(t) \times WAT_s^K \right] \right\} \\ \text{s.l.c. } & \sum_{s=1}^{S_K} \delta_s^K(t) = \delta^K \quad \forall K \in \{A,B,C\} \quad \forall t \in \{1, \dots, T\} \end{aligned}$$

où :

$\delta_s^K(t)$ est la part de SAU allouée à la stratégie d'irrigation s l'année t dans le SdC K

SAU est la surface agricole utile de l'exploitation représentative

$p^K(t)$ est le prix unitaire de la culture produite l'année t dans le SdC K (euros / kg)

$Y_s^K(t)$ est le rendement de la culture produite l'année t dans le SdC K (kg / ha)

$PAC^K(t)$ est le montant des primes compensatoires de la culture produite l'année t dans le SdC K (euros / ha)

$C^K(t)$ est le coût unitaire de production (hors dépenses en eau) de la culture produite l'année t dans le SdC K (euros / ha)

$w(t)$ est coût unitaire de l'eau (euros / m³)

WAT_s^K est la quantité totale d'eau associée à la stratégie d'irrigation s dans le SdC K (euros / ha)

Autrement dit, pour une année donnée, on recherche pour chaque système de culture et chaque tactique d'irrigation la part de SAU (qui peut être nulle à l'optimum) sur laquelle l'agriculteur doit

mettre en œuvre cette tactique d'irrigation de manière à maximiser sa fonction objectif. Dans le programme P_I , la fonction objectif de l'agriculteur est simplement sa marge brute c'est-à-dire la différence entre sa recette (prix de la culture multiplié par le rendement correspondant à la tactique d'irrigation augmenté des primes compensatoires) et ses coûts (coût variable de production plus dépenses spécifiques en eau qui dépendent de la tactique d'irrigation).

La solution du problème d'optimisation P_I permet de déterminer les parts optimales de SAU à allouer à chaque tactique d'irrigation pour chaque année et chaque système de culture, conditionnellement à la surface totale allouée à chaque système de culture. On en déduit alors :

$$MB^K(t|\delta^K)$$

c'est-à-dire la marge brute optimisée de l'agriculteur pour l'année t et le système de culture K sachant qu'une proportion $\delta^K \in [0,1]$ a été allouée au système de culture K .

On doit, à ce stade, souligner un certain nombre d'hypothèses sous-jacentes à l'écriture de ce programme. Premièrement, l'agriculteur connaît parfaitement sa fonction de production et est à même de calculer pour chaque tactique d'irrigation le rendement de chaque culture. Une autre hypothèse sous-jacente du programme P_I de l'agriculteur est qu'il connaît en début de sa campagne d'irrigation toutes les réalisations à venir concernant les variables climatiques du modèle. Autrement dit, l'agriculteur forme des anticipations rationnelles par rapport à l'ensemble des variables climatiques. Ainsi il ne subit aucun risque intra-annuel et aucun comportement de précaution (retrouver l'irrigation aujourd'hui pour un usage demain) n'est présent. Enfin, dans le programme P_I l'agriculteur peut utiliser n'importe quelle tactique 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 incluent typiquement des quotas maximum d'irrigation (en mm) ou bien des interdictions ou des limitations d'irrigation à certaines périodes de l'année dans le cas de sécheresse.

Le choix inter-annuel des systèmes de culture

Etant donnée la marge brute optimale de l'agriculteur pour l'année t et pour chaque système de culture K , $MB^K(t|\delta^K)$, il s'agit maintenant de déterminer la part optimale de SAU qui devrait être allouée à chaque système de culture. Deux approches sont possibles selon que l'on adopte une perspective "historique" ou bien de "gestion de risque".

Perspective historique

Le programme d'optimisation de l'agriculteur P_{2a} s'écrit :

$$\begin{aligned} & \underset{\delta^A, \delta^B, \delta^C}{\text{Max}} \left\{ \sum_{t=1}^T \beta^t \times [U(\delta^A \times MB^A(t|\delta^A) + \delta^B \times MB^B(t|\delta^B) + \delta^C \times MB^C(t|\delta^C))] - \sum_{K=A,B,C} \delta^K \times C^K \right\} \\ & \text{s.l.c } \delta^A + \delta^B + \delta^C = 1 \end{aligned}$$

où β représente le facteur d'escompte et $U(.)$ la fonction d'utilité de l'agriculteur représentatif.

Dans le programme précédent, le terme C^K représente un coût spécifique à chaque système de culture. On peut interpréter le terme C^K comme l'ensemble des coûts non observés (dépenses d'amortissement, contraintes techniques non modélisées, etc.) qui font que l'agriculteur ne choisit pas nécessairement d'allouer toute sa SAU au système de culture qui lui procure une utilité actualisée de la marge brute la plus élevée. Le calibrage de ce paramètre sera discuté dans la section suivante. Dans cette perspective "historique", les parts de surface à allouer à chaque système de culture maximisent la somme actualisée des marges brutes sur l'ensemble des périodes considérées, nettes de la somme des coûts spécifiques à chaque système de culture.

Perspective "risque"

Le programme d'optimisation de l'agriculteur P_{2b} s'écrit :

$$\begin{aligned} & \underset{\delta^A, \delta^B, \delta^C}{\text{Max}} \left\{ \sum_{t=1}^T p(t) \times \left[U \left(\delta^A \times MB^A(t|\delta^A) + \delta^B \times MB^B(t|\delta^B) + \delta^C \times MB^C(t|\delta^C) \right) \right] - \sum_{K=A,B,C} \delta^K \times C^K \right\} \\ & \text{s.l.c } \delta^A + \delta^B + \delta^C = 1 \end{aligned}$$

où $p(t)$ représente la probabilité de réalisation de l'année climatique t et $U(.)$ la fonction d'utilité de l'agriculteur représentatif.

Il est évident que, dans un premier temps, nous considérerons chaque année comme étant équiprobable. Par contre, dans un deuxième temps, il sera possible d'attribuer un poids plus élevé aux années sèches de manière à caractériser l'allocation optimale des surfaces à chaque système de culture dans un contexte de risque de sécheresse plus élevé. Dans cette perspective "risque", les parts de surface à allouer à chaque système de culture maximisent l'espérance de profit brut, nette de la somme des coûts spécifiques à chaque système de culture.

Annexe 2. Paramétrisation du modèle biophysique STICS

Nous décrivons les principales caractéristiques des sols, des itinéraires techniques et des climats retenus pour caractériser la région Midi-Pyrénées, voir Brisson et al. (2006). Pour plus de détails sur le modèle STICS, le lecteur intéressé pourra se référer à Brisson et al. (1998) ou bien Brisson et al. (2003).

Paramétrisation des sols

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).

	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	*

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

Tableau A.1. Principales caractéristiques des sols retenus en Midi-Pyrénées

Paramétrisation des itinéraires techniques

Les itinéraires techniques correspondant aux trois systèmes de culture retenus sont synthétisés dans le tableau A.2. Les itinéraires techniques sont identiques pour les trois types de sol. 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.

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

Tableau A.2. Principales caractéristiques des itinéraires techniques retenus en Midi-Pyrénées.

A.3 Paramétrisation du climat

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 ($T^{\circ} \text{ min}$),
- la température maximale moyenne ($T^{\circ} \text{ max}$),
- le rayonnement cumulé (R),
- l'ETP Penman cumulé (Etp),
- la pluie cumulée.

Station	Année	Mois	Jour/mois	Jour/année	$T^{\circ} \text{ min}$	$T^{\circ} \text{ max}$	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

Tableau A.3. Extrait du fichier climatique pour l'année 1979 en Midi-Pyrénées.

