



**HAL**  
open science

## Comparaison de deux systèmes de tarification de l'eau à usage agricole avec réservation et consommation

Yoro Sidibe, Jean-Philippe Terreaux, Mabel Tidball, Arnaud Reynaud

### ► To cite this version:

Yoro Sidibe, Jean-Philippe Terreaux, Mabel Tidball, Arnaud Reynaud. Comparaison de deux systèmes de tarification de l'eau à usage agricole avec réservation et consommation. 2010. hal-02816864

**HAL Id: hal-02816864**

**<https://hal.inrae.fr/hal-02816864>**

Preprint submitted on 6 Jun 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



**L A M E T A**

Laboratoire Montpellierain  
d'Economie Théorique et Appliquée

U M R  
Unité Mixte de Recherche

# DOCUMENT de RECHERCHE

« Comparaison de deux systèmes  
de tarification de l'eau à usage agricole  
avec réservation et consommation »

Yoro SIDIBE  
Jean-Philippe TERREAUX  
Mabel TIDBALL  
Arnaud REYNAUD

DR n°2010-09

Unité de Formation et de Recherche d'Economie  
Avenue Raymond DUGRAND C.S. 79606  
34960 MONTPELLIER Cedex 2  
Tel : 33 (0) 467158495 Fax : 33(0)467158467  
E-mail : lameta@lameta.univ-montp1.fr

# Comparaison de deux systèmes de tarification de l'eau à usage agricole avec réservation et consommation

Yoro Sidibé\*

Jean-Philippe Terreaux\*\*

Mabel Tidball\*\*\*

Arnaud Reynaud\*\*\*\*

\* Université Montpellier 1 et UMR Lameta. e-mail : yoro.sidibe@supagro.inra.fr

\*\* Cemagref-Bordeaux et UMR Lameta. e-mail : jean-philippe.terreaux@cemagref.fr

\*\*\* Inra-Montpellier et UMR Lameta. e-mail : tidball@supagro.inra.fr

\*\*\*\* Université Toulouse 1 et LERNA e-mail : areynaud@toulouse.inra.fr

Septembre 2010

Nous tenons à remercier tout particulièrement Jean-Marc Berland, de l'Office International de l'Eau, pour avoir rassemblé différentes données indispensables à la réalisation de ce travail.

Ce document a pu être réalisé grâce au contrat Appeau ("Quels agrosystèmes et quelles politiques publiques pour une gestion durable de la ressource en eau? Outils et méthodes pour une gouvernance territoriale") de l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du programme ADD, Agriculture et Développement Durable.

Il a bénéficié aussi du financement de l'Union Européenne, grâce au projet Noviwam ("Novel Integrated Water Management Systems for Southern European Regions"; grant agreement number 245460).

## Résumé

Dans cet article, nous comparons les propriétés de deux systèmes de tarification de l'eau d'irrigation en s'inspirant de systèmes de gestion employés par des Compagnies de gestion d'eau en France, la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG) d'une part et la Compagnie (CAEDS) d'autre part. La modélisation utilise un couplage d'un modèle agronomique de croissance de plante (STICS) avec un modèle d'optimisation du comportement des agriculteurs en univers incertain. Sur des données de la région Midi-Pyrénées, nous comparons ces systèmes tarifaires selon les critères de consommation d'eau, de valeur de la production agricole, du profit de l'agriculteur et des recettes du gestionnaire. L'étude des propriétés fait ressortir que le système de tarification de la CAEDS est plus adapté pour faire face aux sécheresses et en même tant couvrir les coûts du gestionnaire par des recettes plus élevées. Le système de tarification de la CACG a l'avantage de permettre aux agriculteurs de réaliser un profit plus important. Mais tous deux non seulement peuvent participer à une meilleure application de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau, mais aussi ouvrent une voie intéressante à des systèmes de tarification originaux permettant de faciliter l'atteinte des objectifs des gestionnaires de périmètres irrigués.

**Mots-clés** : aléa climatique, aversion au risque, sécheresse, tarification, eau d'irrigation.

## Abstract

In this paper, we compare the properties of two irrigation water pricing systems based on those used by two water management companies in France, the "Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne" (CACG) on one hand and the "Compagnie d'Aménagement des Eaux des Deux-Sèvres" (CAEDS) on the other. We combine an agronomic model of plant growth (STICS) with an optimization model of farmers' behavior in an uncertain context. With data from the Midi-Pyrénées, we compare these pricing systems in term of water consumption, value of agricultural production, farmer's profit and manager's revenue. The study of the properties shows that the pricing system used by CAEDS is better suited to cope with droughts while providing the manager with higher revenues. The pricing system of the CACG has the advantage of allowing farmers to make a larger profit. Both can not only participate in a better implementation of the Water Framework Directive, and also opens an interesting path to original pricing systems that facilitate the achievement of the various objectives of irrigated perimeters managers.

**Key-words**: climatic risk, risk aversion, drought, pricing, irrigation water.

## Introduction

L'équilibre entre l'offre et la demande pour les ressources alimentaires mondiales est fortement dépendant de l'agriculture irriguée (FAO, 2004). Celle-ci continuera à jouer un rôle fondamental dans la lutte contre la faim et contribuera largement à la sécurité alimentaire dans le monde (Fraiture et Wichelns, 2010). Bien que n'occupant que 18% des terres agricoles dans le monde, elle assure 40% de la production alimentaire (Tsur, 2005). Par exemple les apports d'eau en supplément de la pluviométrie naturelle permettent de maintenir, à un niveau élevé, la productivité de plusieurs cultures. Pour les régions les plus arides, la production agricole dépend essentiellement de l'eau apportée grâce à différents systèmes d'irrigation (Rosegrant et al, 2002). Cependant, de plus en plus de voix s'élèvent pour critiquer l'agriculture irriguée à cause de la consommation importante de cette ressource rare et souvent vitale qu'elle nécessite (Elmahdi et al, 2007). Par exemple en France, et plus particulièrement au sud du pays, l'agriculture est le premier poste de consommation d'eau. Ainsi le prélèvement d'eau pour l'irrigation peut atteindre 80% en période estivale (Amigues et al, 2008) dont une très faible partie seulement est restituée rapidement dans les cours d'eau. De ce fait, l'agriculture irriguée est en concurrence avec d'autres secteurs utilisateurs de la ressource, notamment le secteur industriel et celui de la fourniture d'eau potable. Une partie de la solution réside dans la prise en compte de différents coûts de la ressource afin de pouvoir la répartir le plus efficacement entre ces usages alternatifs. Les coûts de l'eau d'irrigation sont non seulement multiples mais aussi importants; ils comprennent les coûts directs (coût d'infrastructure et d'énergie, coûts administratifs) et des coûts indirects (coûts financiers mais aussi coûts d'opportunité pour les autres besoins, coûts environnementaux etc.). Rogers et al (2002), Gleyses et al. (2003) et Terreaux et al. (2005) fournissent une description détaillée de ces différents coûts.

Généralement ces coûts ne sont pas perçus par les utilisateurs, ce qui d'une part ne permet pas une allocation efficiente de la ressource et d'autre part n'assure pas la couverture des coûts directs ou indirects engagés. La prise en compte de ces coûts est devenue une nécessité dans plusieurs pays notamment dans le sud de l'Europe où les conditions climatiques sont à la fois sévères mais aussi très variables (EEA, 2007 ; IPPC ; 2007). Conscient de ces enjeux, à travers la Directive Cadre de l'Eau (WFD), le Conseil Européen a émis des recommandations allant fortement dans le sens de la tarification de l'eau (Iglesias et Blanco, 2008 ; Elnaboulsi, 2008). Il s'agit de faire en sorte que les prix de l'eau traduisent l'importance de ces coûts. Les principes de la Directive visent à favoriser une régulation de l'utilisation de la ressource conciliant, entre autres, l'efficacité globale du système de production utilisant de l'eau d'irrigation, les objectifs environnementaux et la couverture des coûts d'infrastructure (Hrovatin et Bailey, 2002). En France, en particulier, deux instruments sont très généralement utilisés pour la régulation de l'eau d'irrigation : les quotas d'eau et la tarification (Berbel et al, 2008 ; Molle, 2009). Les marchés d'eau sont inexistants car l'eau, *res communis*, n'appartient à personne en particulier et ne peut en conséquence être revendue, contrairement à la situation de cette ressource dans certains pays anglo-saxons comme les Etats Unis (Petrie et Taylor, 2007) et l'Australie (Brooks et Harris, 2008) où ce type d'instrument est assez répandu. Les quotas sont surtout utilisés pour faire face à des objectifs de couverture budgétaire ou d'équité (Molle, 2009). Mais les quotas ne permettent pas d'assurer l'efficacité de l'allocation de la ressource qui consiste à allouer la ressource à ceux qui peuvent en retirer la plus grande production agricole (Tsur et al, 2004). L'étude de différentes tarifications de l'eau peut apporter des solutions intéressantes dans notre contexte.

Par la mise en œuvre d'un système de tarification de l'eau, il s'agit le plus souvent d'obtenir un compromis entre différents objectifs de régulation, objectifs qui peuvent être contradictoires (Johansson et al., 2002). Ces objectifs sont de natures différentes et leurs poids relatifs varient selon les priorités des différents agents économiques. Ceux qui sont les plus mentionnés à la fois dans la littérature économique et par les responsables de la gestion de la ressource en eau sont l'efficacité allocative (Garcia et Reynaud, 2004), l'équité (Burt, 2007; Elnaboulsi, 2008), la couverture de certains coûts administratifs ou de fonctionnement (Easter et Liu, 2007). Mais d'autres aspects peuvent aussi être pris en compte, comme la capacité de prévoir la demande notamment dans un cadre d'aléas naturels, la notion d'acceptabilité (Thomas et Nauges; 2008). Rogers et al (2002) donnent une liste très détaillée d'objectifs. Pour répondre à ces derniers, des formes de tarification variées ont été développées, des plus simples aux plus élaborées. Ainsi, des formes linéaires de tarification permettent de satisfaire des préoccupations d'efficacité et d'équilibre budgétaire (tarification au coût moyen). (Tsur et al, 2004). La tarification par blocs croissants ou décroissants peut permettre de répondre à l'efficacité, à la couverture budgétaire ou encore à l'équité suivant l'acceptation de ce concept pour le gestionnaire (Guille et al, 2006).

Cependant le gestionnaire est souvent confronté en outre à différentes contraintes, ce qui va le limiter dans la poursuite des objectifs. En agriculture, ces contraintes sont souvent en lien avec les aléas naturels, qu'il s'agisse des risques climatiques, mais aussi des risques biotiques par exemple. Elles peuvent être aussi liées à des aléas de tout autre ordre, par exemple financiers ou personnels. S'il est vrai qu'une meilleure maîtrise technologique des moyens matériels de production a largement contribué à réduire les risques productifs en agriculture au cours de ces dernières décennies, il n'en demeure pas moins que les aléas pluviométriques restent un élément majeur du contexte sous nos latitudes.

Cette situation est parfaitement illustrée par les épisodes de sécheresse du Sud de la France, notamment depuis le début des années 90, événements qui se sont apparemment accélérés récemment (Amigues et al., 2006). Il semble plausible que la survie des systèmes de productions agricoles dépendra de leur capacité à s'adapter à ces fluctuations climatiques (Reynaud, 2008 ; Itier, 2008). Des outils de gestion adéquats visant à réduire la vulnérabilité des exploitations agricoles sont de ce fait nécessaires.

Ces différents constats rendent impératif plus que jamais l'intégration de considérations liées aux risques climatiques dans l'élaboration des politiques de gestion de l'eau (Just, 2003). Les contraintes dues aux facteurs climatiques peuvent se manifester de plusieurs manières en agriculture. Elles se présentent par le caractère inter-temporel qui est inhérent à la nature des décisions de l'agriculteur et par les aspects stochastiques plus liés à la nature hasardeuse du climat. La contrainte liée au caractère inter-temporel est due au décalage qui existe entre la décision de cultiver et l'évènement climatique (principalement la pluie). En effet, l'agriculteur prend ses décisions alors qu'il ne dispose pas encore de certaines informations. En climat tempéré, les décisions de planter (surtout pour les cultures saisonnières) sont prises avant de connaître la pluviométrie à venir en été. L'agriculteur doit donc prendre certaines décisions dans un cadre d'informations incomplètes. La fluctuation climatique peut ne pas permettre à l'agriculteur d'ajuster ses différentes décisions que ce soit les choix des cultures (cultures plus ou moins consommatrices d'eau) ou l'itinéraire technique.

L'évaluation réaliste d'un système de tarification exige donc la prise en considération de cette contrainte fondamentale qu'est l'aléa climatique. Les effets de l'aléa peuvent être notamment atténués si le gestionnaire possède des informations même partielles (Biol et al, 2006). Dans cette étude, nous nous intéressons à des systèmes originaux de tarification qui en plus des objectifs traditionnels (efficacité, équilibre budgétaire etc.) permettent de répondre à d'autres objectifs. En effet, en intégrant dans leur facture un terme de souscription se rapportant à un volume d'eau réservé par l'agriculteur avant la saison agricole, ces systèmes tarifaires peuvent permettre au gestionnaire d'inférer la demande agricole future. Cette particularité qui rend ainsi prévisible la demande agricole conduit à une anticipation du déséquilibre éventuel entre l'offre et la demande, et à une possible adaptation des techniques d'irrigation. La littérature sur la tarification de l'eau d'irrigation (Tsur et Dinar, 1995 ; Johansson, 2000 ; Johansson et al, 2002 ; Groom et al, 2006) ne fait pas mention d'un tel système tarifaire. Il n'est pas non plus signalé par la revue de littérature sur les modèles de tarification réalisée par Monteiro (2005).

Plus précisément, notre travail qui est réalisé dans une optique comparative s'inspire du système de tarification mis en place d'une part par la Compagnie d'Aménagement des Eaux des Deux-Sèvres (CAEDS) et d'autre part par la Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne (CACG). Leurs structures présentent la similarité que la facture d'eau dépend à la fois des quantités d'eau réservées et des quantités d'eau réellement consommées. En partant d'un modèle économique classique de décision (maximisation de la fonction d'utilité) dans un cadre aléatoire (aléa climatique), nous montrons que de tels systèmes tarifaires présentent de réels avantages. A l'aide de données agronomiques et climatiques, une estimation des fonctions de production est réalisée ce qui nous permet de simuler le modèle et de déduire les avantages comparatifs des systèmes de tarification des deux Compagnies d'Aménagement.

Les apports de cet article sont de deux ordres. Tout d'abord en termes méthodologiques nous montrons comment la prise en compte d'aléas climatiques dans le modèle de décision de l'agriculteur, averse au risque, permet de mettre en évidence les propriétés particulières de ces systèmes de tarification. Ensuite en termes empiriques, l'application du modèle aux grandes cultures dans le sud-ouest de la France permet de décrire, à travers un certain nombre de critères, les points communs et les avantages relatifs de ces systèmes de tarification.

Le reste de l'article est organisé de la manière suivante. Dans la section suivante, nous présentons les modes de tarification des deux Compagnies d'Aménagement et le modèle de décision de l'agriculteur en univers incertain. La section 2 est consacrée aux données et à la méthodologie d'estimation des fonctions de production. Dans la troisième section est présentée l'analyse des résultats de la simulation du modèle.



## 1. Systèmes tarifaires et modèle de décision

### 1.1. Le système tarifaire de la CACG

Le mode de tarification appliqué par la CACG repose sur une souscription faite en début de saison agricole. A la fin de la saison, la consommation effective et la quantité souscrite sont facturées selon la formule suivante :

$$F(S, C) = pS + \max(0, p'(C - S))$$

qui peut être développé comme suit :

$$F(S, C) = \begin{cases} pS & \text{si } C \leq S \\ pS + p'(C - S) & \text{si } C > S \end{cases}$$

$S$  désigne la quantité d'eau réservée par l'agriculteur.

$C$  est la quantité d'eau qu'il consomme effectivement pendant la campagne agricole.

$p$  est le prix unitaire de la quantité d'eau réservée si celle-ci ne dépasse pas la consommation effective  $C$ .

$p'$  est le prix unitaire du dépassement de la réservation  $S$  par la consommation  $C$ .

Quand la souscription est inférieure à la quantité consommée, seule la souscription est facturée à un prix  $p$ . Au delà de cette valeur, la tarification porte sur la souscription et sur la différence entre consommation effective et cette souscription qui est "surfacturée" par un prix unitaire  $p'$  supérieur à  $p$ . Cette "surfacturation" a pour rôle de décourager toute consommation au-delà de la quantité souscrite. Dans la suite du document nous étudions le comportement optimal de l'agriculteur rationnel vis-à-vis de ce mode de tarification.

### 1.2. Le système tarifaire de la CAEDS

Le système de tarification de la CAEDS présente des similarités mais également de grandes différences avec celui de la CACG. En effet, tout comme le système de tarification de la CACG, le prix payé se fonde sur deux quantités d'eau, celle souscrite en début de saison agricole et celle effectivement consommée. Cependant le mode de tarification n'est pas linéaire comme dans le cas de la CACG, mais est quadratique au delà d'un certain seuil. Le contrat qui lie la compagnie et les agriculteurs est en fait assez compliqué; mais en conservant l'esprit du système de tarification et ses propriétés essentielles, on peut le traduire par la formule suivante :

$$F(C, S) = \lambda B \left( aS + (1 - a) \frac{\max(C, bS) C}{S} \right)$$

$B$  représente le budget prévisionnel du gestionnaire.  $a$  et  $b$  sont des paramètres d'ajustement compris entre 0 et 1.  $\lambda$  est un paramètre qui peut être ajusté pour assurer l'équilibre budgétaire.

La précédente formule peut être réécrite :

$$F(C, S) = \begin{cases} \lambda B \left( aS + (1 - a) \frac{C^2}{S} \right) & \text{si } C \geq bS \\ \lambda B (aS + (1 - a)bC) & \text{si } C < bS \end{cases}$$

Il est facile de remarquer que la facture ainsi définie est conçue de manière à être linéaire en  $C$  si la consommation est inférieure à une certaine proportion de la réservation ( $bS$ ). Par contre si la consommation dépasse cette fraction de la réservation la facture est quadratique en  $C$  ce qui a pour effet de décourager la "surconsommation". Le paramètre  $a$  permet d'affecter une certaine pondération à la partie réservation par rapport à l'autre partie de la formule de facturation. Le paramètre  $b$  rend la formule plus souple en permettant au gestionnaire d'inciter les agents à réserver au moins leur consommation divisée par la valeur de ce paramètre (Tidball et Terreux, 2008).

### 1.3. Le modèle de décision en univers incertain

Avant de présenter le modèle décisionnel de l'agriculteur en environnement incertain, nous commençons par décrire ce que serait le modèle en l'absence de tout aléa. Autrement dit, nous décrivons le modèle déterministe de décision qui constituera une introduction au modèle stochastique. Le problème de l'agriculteur rationnel est de choisir les variables de décision (réservation d'eau  $S$  et consommation  $C$ ) de manière à maximiser son profit net de la facture d'eau. Si nous représentons par  $h(C)$  la fonction de gain de l'agriculteur en termes monétaires (prix du produit agricole multiplié par la fonction de production de ce produit), le problème d'optimisation se formule de la manière suivante :

$$\text{Max}_{S,C} [h(C) - F(C, S)]$$

Cette formulation générale est indépendante du système tarifaire que nous considérons.

Pour rendre le cadre d'analyse plus réaliste, nous considérons un aléa climatique qui consiste en une fluctuation du niveau de pluie d'une année à l'autre. La quantité d'eau disponible pour les plantes dépend d'une part d'un facteur déterminé par l'irrigant que l'on appelle « consommation » et d'autre part par la quantité de pluie qui est stochastique. Dans un souci de simplification, nous supposons deux états de la nature possible. Un état appelé « sécheresse » caractérisé par un niveau faible de pluie que nous notons  $\pi_1$  qui est affecté d'une probabilité  $\varphi$  et un autre état appelé « humidité » caractérisé par un niveau de pluie plus élevé noté  $\pi_2$ , avec une probabilité d'occurrence  $(1-\varphi)$ . Le problème de l'agriculteur rationnel consiste à choisir les variables de décision (réservation d'eau  $S$  et consommation  $C$ ). La quantité souscrite est choisie avant de connaître l'état de la nature pour l'année considérée. La consommation est ensuite choisie lorsque cet état est observé. La prise en compte de cette chronologie des événements permet de formuler le problème comme suit :

$$\text{Max}_S E \left[ \max_C h(C + \pi) - F(C, S) \right]$$

L'agriculteur choisit sa réservation  $S$  de manière à maximiser l'espérance de son profit net de la facture d'eau. Quant au niveau de consommation  $C$ , le choix étant effectué une fois l'état de la nature observé, il dépend de ce dernier. Un niveau  $C_1$  est choisi pour maximiser le profit si l'année est une année de sécheresse et  $C_2$  si elle ne l'est pas. La forme développée du problème permet d'illustrer ce fait.

$$\text{max}_S \left\{ \begin{array}{l} \varphi \max_{C_1} [h(C_1 + \pi_1) - F(S, C_1)] + \\ (1 - \varphi) \max_{C_2} [h(C_2 + \pi_2) - F(S, C_2)] \end{array} \right.$$

Dans la section suivante, une estimation de la fonction de production agricole et des niveaux de pluie permettra de réaliser des simulations du modèle.

### *Prise en compte de l'aversion au risque*

Dans la section précédente nous supposons implicitement que l'agriculteur est neutre vis-à-vis du risque, c'est-à-dire que l'utilité de son espérance de profit est égale à son espérance d'utilité du profit. Cependant, plusieurs études tendent à prouver que l'agriculteur n'est généralement pas neutre, mais averse au risque. Ce qui veut dire que l'agriculteur préfère l'utilité de l'espérance du profit à l'espérance de l'utilité du profit. Cette attitude de l'agriculteur vis-à-vis du risque a des conséquences sur les résultats du modèle et la comparaison des deux systèmes de tarification, d'où l'importance de sa représentation.

Pour modéliser le comportement de l'agriculteur face au risque, il nous faut adjoindre une fonction d'utilité à la fonction qui représente le profit de l'agriculteur. Suivant [Moschini et Hennessy \(2001\)](#), nous optons pour une fonction d'utilité avec aversion relative pour le risque constant (CRRA), en raison de sa simplicité et de sa facilité d'interprétation. En outre cette forme fonctionnelle est la plus utilisée en économie agricole, ce qui nous permet d'avoir des résultats d'estimation des paramètres à partir d'autres études. Si nous représentons par  $G(S, C) = h(C + \pi) - F(S, C)$  le profit de l'agriculteur net de la facture d'eau, l'utilité avec une aversion au risque de type CRRA s'écrit :

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

Dans cette expression,  $\alpha$  représente l'aversion au risque de l'agriculteur (Reynaud, 2008). Ce coefficient est également appelé coefficient d'Arrow-Pratt. Le modèle précédent devient alors:

$$\max_S \left\{ \begin{array}{l} \varphi \max_{C_1} U(h(C_1 + \pi_1) - F(S, C_1)) + \\ (1 - \varphi) \max_{C_2} U(h(C_2 + \pi_2) - F(S, C_2)) \end{array} \right.$$

En mettant en rapport l'espérance du profit et l'espérance de l'utilité du profit, on détermine la prime de risque et l'équivalent certain. La prime de risque est définie comme le montant monétaire,  $P$ , que l'agriculteur est prêt à sacrifier pour éviter toute forme d'aléa dans son profit. Elle est définie par la condition suivante

$$U(E(G) - P) = E(U(G))$$

La formule de la prime de risque découle de cette condition.

$$P = E(G) - U^{-1}(E(U(G)))$$

$G$  est le profit de l'agriculteur qui est une variable aléatoire liée au niveau de pluie. L'expression  $U^{-1}(E(U(G)))$  représente l'équivalent certain qui traduit le niveau certain de profit permettant d'obtenir un niveau d'espérance d'utilité égal à celui de l'activité agricole soumise à l'aléa.

## 2. Données et estimation de la fonction de production agricole

### 2.1. Fonction de production

Les données de base sont des données brutes relatives aux grandeurs agronomiques (types de cultures, apports d'eau, sol) et climatiques (températures, évaporation) sur 10 ans (1998 à 2007). On considère, pour chacune des années, une campagne agricole qui se déroule à pas de temps régulier indiqué  $t$ , avec  $t$  élément de l'ensemble  $\{1, \dots, T\}$  avec  $T=9$ . Chaque pas de temps correspond à un apport possible d'eau par l'agriculteur. La production agricole est non seulement fonction de la quantité totale d'eau apportée pendant la campagne agricole mais également de la manière dont cette eau est répartie sur la durée de la campagne. Le modèle de croissance de culture STICS permet d'associer aux variables agro-climatiques un rendement pour la culture considérée (Reynaud, 2008). Il devient alors possible à l'aide des techniques des MCO d'obtenir une fonction de production agricole ayant pour variable le vecteur d'apport d'eau. La fonction obtenue présente la forme suivante :

$$F(x_1, \dots, x_T) = a_0 + \sum_{i=1}^T a_i x_i + \sum_{i=1}^T a_{(9+i)} x_i^2 + \sum_{j=2}^T \sum_{j>i} b_{i,j} x_i x_j + \varepsilon$$

$x_1 \dots x_T$  représentent les apports d'eau à différentes dates de 1 à  $T$ .

On suppose ensuite qu'ayant à disposition une quantité totale d'eau, l'agriculteur est en mesure de la répartir de manière à optimiser son rendement. Pour obtenir une fonction de production agricole avec une seule variable de consommation d'eau (et non un vecteur), il suffit donc d'optimiser la précédente fonction sous la contrainte que la somme des apports d'eau est égale à une quantité totale.

$$\underset{x_1, \dots, x_T}{\text{Max}} F(x_1, \dots, x_T) = a_0 + \sum_{i=1}^T a_i x_i + \sum_{i=1}^T a_{(9+i)} x_i^2 + \sum_{j=2}^T \sum_{j>i} b_{i,j} x_i x_j + \varepsilon$$

$$SC \sum_{i=1}^T x_i = C$$

En faisant varier cette quantité totale dans le modèle, on obtient un tableau qui associe un rendement agricole à une quantité d'eau. Une régression permet enfin d'obtenir une fonction de production agricole de la forme  $F(C) = a(C + \alpha_3)^{\alpha_1}$ . En multipliant cette fonction par le prix du marché de la culture considérée, on obtient la fonction de gain agricole  $h(C) = \alpha_2(C + \alpha_3)^{\alpha_1}$ .

Dans ce document nous appliquons notre système de tarification à la culture du maïs qui est la principale culture irriguée dans le sud-ouest de la France, et aussi dans plusieurs pays méditerranéens (Meza et al, 2008). Dans le cas de cette céréale, les neuf apports possibles d'eau d'irrigation sont répartis de mi-juin à fin-août. Nous considérons, toujours pour le maïs, que pour différentes considérations liées au matériel d'irrigation, à chacune de ces neuf périodes, de neuf jours, l'agriculteur peut apporter une dose de 25 ou 50 mm ou sinon décider de ne pas irriguer, ce qui correspond à une dose nulle. De ce fait le cumul maximum des doses apportées ne peut excéder 450 mm pour l'ensemble de la saison.

Les données climatologiques et pédologiques retenues pour les fins de la simulation sont détaillées en annexe A. Quatre types de sols ont été retenus pour nos travaux. Les principaux calculs sont

réalisés avec le sol de type 1, les autres types de sol permettent d'effectuer des tests de sensibilité par rapport à la pédologie et permettent aussi des exercices de statique comparative.

## 2.2. Niveaux de pluviométrie

Pour la détermination des niveaux de pluie,  $\pi_1$  en cas d'été sec, ou  $\pi_2$  pour les étés humides, et leur probabilité d'occurrence (respectivement  $\varphi$  et  $(1-\varphi)$ ), nous utilisons les données pluviométriques de 1998 à 2007. Toutefois la notion de sécheresse doit être précisée avant d'aller plus avant.

Déterminer le paramètre  $\varphi$  qui est la probabilité de l'été sec nécessite d'adopter une définition précise de la sécheresse. Or les définitions de ce terme sont plus ou moins précises et varient selon la discipline considérée, selon les objectifs et les besoins et aussi selon la zone géographique prise en compte. Il est possible de présenter de manière sommaire les définitions en trois grands ensembles si nous nous plaçons du point de vue disciplinaire (Amigues et al, 2006) :

- la sécheresse météorologique quand il y a une importante déviation des précipitations en dessous d'une certaine moyenne considérée comme « normale ».
- la sécheresse agricole quand il n'y a pas assez d'humidité pour les cultures. Cette condition peut avoir lieu, même si les précipitations sont normales, à cause des conditions pédologiques et des techniques agricoles, ou du choix de plantes inadaptées.
- la sécheresse hydrologique quand les niveaux d'eau dans des réservoirs naturels (aquifères, lacs, fleuves...) descendent en dessous d'une certaine moyenne jugée « normale ». Cette situation peut se présenter même si la pluviométrie est supérieure à la moyenne.

En plus de ces définitions, il existe une multitude d'indices, notamment aux Etats Unis, essayant de capturer soit une seule dimension de ce concept, soit la complexité de la notion de sécheresse mais de manière très synthétique par un seul nombre (indices de Palmer, de Kincer, de Blumenstock... voir Richard et Heim, 2002).

Etant donné notre objectif qui est de chercher à prendre en compte les aléas climatiques, nous utiliserons ici la définition météorologique de la notion de sécheresse, qui reste subjective car elle dépend de ce que l'on entend par "importante" déviation par rapport à la normale. Pour ces raisons nous définissons la sécheresse en nous fixant arbitrairement une probabilité  $\varphi$ . L'année sèche est alors définie comme toute année dont la pluviométrie est inférieure à la pluviométrie qui a la probabilité  $\varphi$  de non-dépassement. Nous ferons ensuite varier  $\varphi$  ce qui permettra de vérifier la stabilité des résultats vis-à-vis de la valeur choisie. La méthode et les données sont détaillées en annexe C.

## 2.3. Le coefficient d'aversion au risque

Les travaux qui portent sur l'estimation de l'aversion au risque en France ne portent pas spécifiquement sur l'irrigation (Reynaud ; 2008). Par contre, la plupart des études conduites en agriculture en général permettent d'estimer ce paramètre du coefficient d'aversion au risque autour de 0.2 et 0.3 pour les grandes cultures. Nous choisirons donc pour l'agriculteur représentatif un coefficient égal à 0.2 (qui correspond à un agriculteur légèrement averse au risque au sens de Holt et Laury (2002)) et effectuerons un test de sensibilité avec un coefficient égal à 0.3.

Ces différents paramètres permettent de calculer, en fonction du système de tarification retenu:

- Les niveaux de réservation  $S$  et de consommations en été sec  $C_1$  et en été humide  $C_2$ .
- Le gain agricole total (en terme monétaire)  $h(C + \pi)$ .
- Le profit net de l'agriculteur  $h(C + \pi) - F(S, C)$ .
- Le revenu du gestionnaire  $F(S, C)$ .

### 3. Simulation et Analyse des résultats

Nous présentons dans le tableau 1, les résultats des simulations économiques des décisions des agriculteurs. Ces simulations permettent d'obtenir les niveaux de consommation d'eau ('conso sèche' en été sec et 'conso humide' en été humide) et de réservation, le gain agricole global (quantités produites multipliées par les prix), le profit et les recettes du gestionnaire (recettes permettant par exemple d'équilibrer le coût qu'il doit supporter pour acheminer l'eau). Ces coûts sont supposés indépendants de la quantité d'eau consommée par l'agriculteur. Les simulations sont réalisées avec les deux systèmes tarifaires (notés CAEDS et CACG) en fixant un critère d'égalité entre les deux modes de gestion (consommation d'eau en été sec ('A conso égales'), profit de l'agriculteur, recettes du gestionnaire, ou valeur totale de la production agricole ('A gains égaux')). Cette manière de procéder, permet de comparer les systèmes tarifaires en examinant les valeurs prises par les autres résultats : par exemple avec le même profit de l'agriculteur induit par les deux systèmes, il est possible de comparer les niveaux de consommation. Tout se passe comme si le gestionnaire décidait de changer de système de tarification, en conservant une valeur fixe pour un des résultats. Par exemple, si le gestionnaire décide de passer du système CAEDS au système CACG tout en voulant conserver le même gain agricole global, l'analyse permet de voir dans quel sens le profit de l'agriculteur, sa consommation en été sec ou humide et les recettes du gestionnaire évoluent. Les paramètres du système tarifaire de la CAEDS sont initialement fixés en s'inspirant de ce qui est réellement implémentée par la Compagnie en question.

**Tableau 1** : Comparatif des systèmes de tarification de la CAEDS et de la CACG. Sol 1.  $\varphi=0.5$ .

Critères	Mode de tarification	Conso sèche	Conso humide	Reservation	Profit	Gain agricole	Recette
A conso égales	CAEDS	206,84	189,03	165,77	783,70	1115,25	331,54
	CACG	207,85	129,85	129,85	868,94	1066,80	197,86
A profits égaux	CAEDS	206,84	189,03	165,77	783,70	1115,25	331,54
	CACG	125,53	47,53	47,53	784,92	912,01	127,09
A recettes égales	CAEDS	206,84	189,03	165,77	783,70	1115,25	331,54
	CACG	353,75	275,75	275,75	964,80	1296,52	331,71
A gains égaux	CAEDS	206,84	189,03	165,77	783,70	1115,25	331,54
	CACG	235,55	157,55	157,55	891,39	1114,07	222,68

La consommation d'eau en été sec est supérieure à la consommation en été humide quel que soit la tarification que l'on considère, ce qui correspond à l'intuition.

A consommation égale en cas d'été sec, le profit est plus important pour la tarification CACG. Le gain agricole est un peu plus faible et le budget collecté par le gestionnaire est nettement plus réduit par rapport au système CAEDS. Cependant, il faut remarquer qu'en cas d'été humide la consommation est moindre pour la CACG.

La comparaison à profit égal permet d'observer une plus faible consommation pour le système type CACG. Par contre la production agricole est plus grande avec celui du type CAEDS ainsi que son budget.

En supposant que par les deux modes de tarification le même budget est prélevé, on constate que la consommation est plus importante au niveau du système CACG.

Enfin, à production agricole égale, la CAEDS prélève un budget plus important au détriment du profit de l'agriculteur. En ce qui concerne les consommations, elles sont sensiblement égales en moyenne.

Les autres simulations permettent de tester la stabilité de ces résultats par des tests de sensibilité.

**Tableau 2** : Test de sensibilité avec le sol de type 6.  $\varphi=0.5$  .

Critères	Mode de tarification	Conso sèche	Conso humide	Reservation	Profit	Gain agricole	Recette
A conso égales	CAEDS	73,83	54,14	54,17	955,27	1063,60	108,33
	CACG	73,96	0,00	0,00	950,72	1021,25	70,52
A profits égaux	CAEDS	73,83	54,14	54,17	955,27	1063,60	108,33
	CACG	85,61	0,00	0,00	955,38	1032,01	76,62
A recettes égales	CAEDS	73,83	54,14	54,17	955,27	1063,60	108,33
	CACG	132,28	44,88	44,88	997,12	1105,37	108,25
A gains égaux	CAEDS	73,83	54,14	54,17	955,27	1063,60	108,33
	CACG	105,15	17,75	17,75	974,88	1063,73	88,85

Les résultats en ce qui concerne la quantité d'eau consommée sont très liés à la nature du sol. En effet, avec le type de sol 6, on constate une chute de la consommation d'eau que ce soit en cas de sécheresse ou d'humidité. Cela est lié au fait que le sol 6 est plus limono-argileux et possède une plus grande capacité de rétention d'eau, ce qui peut constituer une importante réserve facilement utilisable (RFU) limitant ainsi de manière considérable la nécessité d'irrigation d'appoint. Cependant les observations générales faites pour le sol de type 1 restent valables.

Nous effectuons une simulation avec le type de sol 2, simulation dont les résultats constituent le Tableau 3.

**Tableau 3** : Test de sensibilité avec le sol de type 2.  $\varphi=0.5$  .

Critères	Mode de tarification	Conso sèche	Conso humide	Reservation	Profit	Gain agricole	Recette
A conso égales	CAEDS	87,09	71,60	66,70	937,97	1071,36	133,40
	CACG	87,09	9,09	9,09	939,34	1019,72	80,38
A profits égaux	CAEDS	87,09	71,60	66,70	937,97	1071,36	133,40
	CACG	85,74	7,74	7,74	937,87	1017,26	79,38
A recettes égales	CAEDS	87,09	71,60	66,70	937,97	1071,36	133,40
	CACG	153,27	75,27	75,27	995,19	1128,50	133,30
A gains égaux	CAEDS	87,09	71,60	66,70	937,97	1071,36	133,40
	CACG	116,92	38,92	38,92	968,15	1071,54	103,39

Ces résultats permettent de confirmer qu'effectivement le niveau d'irrigation dépend de la nature du sol. Les consommations sont plus élevées avec ce type de sol qu'avec le sol 6 mais plus faibles qu'avec le sol 1. En effet le sol de type 2 est aussi un sol limoneux argileux.

Le tableau suivant résume les résultats pour les trois types de sol et pour le même gain agricole vis-à-vis des deux systèmes de tarification.

**Tableau 4** : Comparaison des résultats des différents types de sol.

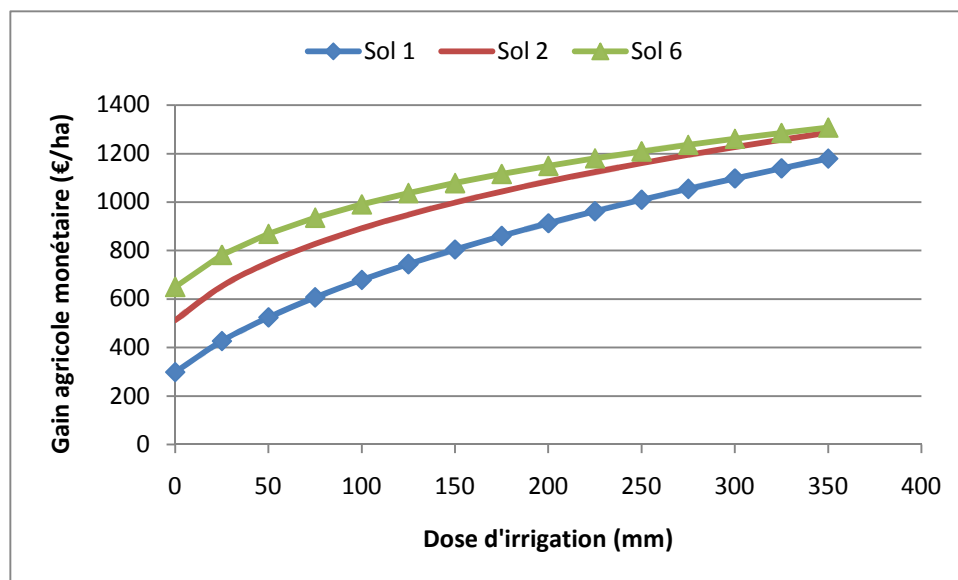
Type de sol	Mode de Tarification	Consommation en été sec (mm)	Consommation en été humide (mm)	Consommation moyenne (mm)	Profit de l'agriculteur (€/ha)	Recette du gestionnaire (€/ha)
Sol 1	CAEDS	206,84	189,03	197,93	783,70	331,54
	CACG	235,55	157,55	196,55	891,39	222,68
Sol 2	CAEDS	87,09	71,60	79,34	937,97	133,40
	CACG	116,92	38,92	77,92	968,15	103,39
Sol 6	CAEDS	73,83	54,14	63,99	955,27	108,33
	CACG	105,15	17,75	61,45	974,88	88,85

On observe que pour chaque type de sol, la consommation moyenne d'eau est pratiquement identique pour les systèmes tarifaires de la CAEDS et de la CACG. Par contre, en été **sec** la consommation est plus grande pour la CACG alors que c'est en été humide que la consommation est élevée pour la CAEDS. Quelque soit le type de sol considéré, le gestionnaire qui applique la tarification de la CAEDS obtient plus de revenu.

Par ailleurs, on constate que le sol de type 1 entraîne la plus grande consommation d'eau suivi par le sol de type 2 et ensuite de type 6, mais les observations concernant la comparaison des deux systèmes de tarification ne varient pas.

Suivant les objectifs que le gestionnaire juge prioritaires, il est possible de mettre en place une tarification différentielle selon la nature des sols des différents agriculteurs. Par exemple, il pourrait différencier les paramètres de la tarification pour obtenir le même revenu avec le minimum de distorsion dans la production agricole globale.

Les résultats restent cohérents et stables dans l'ensemble et vis-à-vis des tests de sensibilité portant sur l'ensemble des paramètres.



**Figure 1** : graphique représentant la fonction de production selon le type du sol.

Le graphique précédent permet de visualiser les courbes représentatives des fonctions de production selon la nature des sols. Le sol 6 est le plus productif suivi par le sol 2 et ensuite le sol 1.



D'autres simulations faisant varier les paramètres de la tarification et la probabilité d'occurrence de l'été sec sont en annexe C. Elles montrent une bonne stabilité des observations.

### Résultats du modèle avec aversion au risque

Analysons à présent l'impact de l'introduction de l'aversion au risque de l'agriculteur. Comme précédemment, et dans un souci comparatif, nous faisons la simulation et des tests de sensibilité.

**Tableau 5** : Simulation avec Sol de type 1.  $\varphi=0,5$ . Modèle prenant en compte l'aversion au risque avec coefficient d'aversion au risque  $\alpha=0,2$ .

	Mode de tarification	Profit sec	Profit humide	U Profit sec	U Profit humide	E de Profit	Espérance d'U	Utilité d'E
A conso égales	CAEDS	718,61	848,79	241,05	275,39	783,70	258,22	258,36
	CACG	801,23	936,95	262,98	298,05	869,09	280,51	280,61
A profits égaux	CAEDS	718,61	848,79	241,05	275,39	783,70	258,22	258,36
	CACG	705,36	864,48	237,49	279,46	784,92	258,47	258,68
A recettes égales	CAEDS	718,61	848,79	241,05	275,39	783,70	258,22	258,36
	CACG	908,45	1020,77	290,77	319,19	964,61	304,98	305,11
A gains égaux	CAEDS	718,61	848,79	241,05	275,39	783,70	258,22	258,36
	CACG	826,26	956,52	269,53	303,02	891,39	286,27	286,39

Nous remarquons que l'utilité de l'espérance du profit est très légèrement supérieure à l'espérance de l'utilité du profit. L'analyse de l'effet de l'attitude face au risque est particulièrement intéressante quand nous considérons le cas où l'agriculteur obtient le même profit ou la même production agricole avec les deux systèmes de tarification. Nous observons qu'à même profit espéré, l'utilité espérée est la même quel que soit le système de tarification que nous considérons. D'autre part, pour un même gain agricole, la CACG engendre une plus grande utilité espérée pour l'agriculteur.

**Tableau 6** : Simulation avec Sol de type 1.  $\varphi=0,1$ . Modèle prenant en compte l'aversion au risque avec coefficient d'aversion au risque  $\alpha=0,2$

	Mode de tarification	Profit sec	Profit humide	U Profit sec	U Profit humide	E de Profit	Espérance d'U	Utilité d'E
A conso égales	CAEDS	647,27	799,63	221,71	784,40	262,56	258,47	258,55
	CACG	721,26	882,07	241,76	865,99	284,00	279,77	279,85
A profits égaux	CAEDS	647,27	799,63	221,71	784,40	262,56	258,47	258,55
	CACG	612,87	803,40	212,23	784,34	263,54	258,41	258,53
A budgets égaux	CAEDS	647,27	799,63	221,71	784,40	262,56	258,47	258,55
	CACG	868,71	994,57	280,55	981,98	312,62	309,41	309,50
A gains égaux	CAEDS	647,27	799,63	221,71	784,40	262,56	258,47	258,55
	CACG	780,26	926,22	257,45	911,62	295,31	291,53	291,58

Les observations avec le tableau 4 restent valables.

**Tableau 7** : Simulation avec Sol de type 1.  $\varphi=0,5$ . Modèle prenant en compte l'aversion au risque avec coefficient d'aversion au risque  $\alpha=0,3$ .

	Mode de tarification	Profit sec	Profit humide	U Profit sec	U Profit humide	E de Profit	Espérance d'U	Utilité d'E
A conso égales	CAEDS	647,27	799,63	221,71	784,40	262,56	258,47	258,55
	CACG	721,26	882,07	241,76	865,99	284,00	279,77	279,85
A profits égaux	CAEDS	647,27	799,63	221,71	784,40	262,56	258,47	258,55
	CACG	612,87	803,40	212,23	784,34	263,54	258,41	258,53
A recettes égales	CAEDS	647,27	799,63	221,71	784,40	262,56	258,47	258,55
	CACG	868,71	994,57	280,55	981,98	312,62	309,41	309,50
A gains égaux	CAEDS	647,27	799,63	221,71	784,40	262,56	258,47	258,55
	CACG	780,26	926,22	257,45	911,62	295,31	291,53	291,58

D'autres simulations en annexe C confirment les mêmes tendances.

En définitive, on constate que la prise en compte de l'aversion au risque ne change pas les résultats obtenus avec un agriculteur neutre au risque. Ces résultats sont discutés en détails dans la section suivante.

### *Discussion sur les propriétés comparatives des deux formes de tarification*

Dans la section précédente, nous avons étudié dans un cadre analytique les deux modes de tarification dans le cas d'aléa climatique. Les fonctions de production estimées nous ont ensuite permis de faire une comparaison numérique. Les tests de sensibilité vis-à-vis des différents paramètres montrent que les résultats restent robustes et stables. Les principales conclusions à tirer sont les suivantes :

L'agriculteur a bien entendu toujours une consommation d'eau plus élevée en été sec indépendamment de la nature du sol et du système tarifaire considéré : En effet, la sécheresse amène l'agriculteur à avoir un recours plus important à l'eau d'irrigation pour compenser le déficit climatique.

A même volume d'eau consommée en été sec, la tarification type CACG entraîne une moindre consommation d'eau en été humide, mais une plus faible production agricole en moyenne que la tarification type CAEDS. En outre cette dernière permet au gestionnaire de prélever un plus grand budget mais conduit à un profit plus faible pour l'agriculteur.

A même profit pour l'agriculteur, la tarification CAEDS est plus consommatrice d'eau bien qu'apportant une plus grande production agricole. Le budget prélevé est supérieur à celui issu de la tarification CACG.

A budgets égaux, la tarification CACG est plus efficace en termes de production agricole avec une plus grande consommation d'eau. Le profit de l'agriculteur est plus élevé.

Enfin, à productions agricoles égales, la tarification CAEDS est plus favorable au gestionnaire en termes budgétaire (probablement lié à la forme quadratique de la facture) tandis que la tarification CACG est plus favorable à l'agriculteur en termes de profit agricole. Les consommations d'eau dans les deux cas sont sensiblement égales en moyenne. Cependant, la tarification CAEDS permet une répartition plus équilibrée entre été sec et été humide en ce sens qu'elle induit une plus faible consommation en été sec et une plus grande consommation d'eau en été humide comparée à la tarification CACG. La consommation d'eau pour la tarification CAEDS est donc moins variable. Ce résultat peut s'expliquer de la manière suivante. Le système de facturation de la CAEDS est convexe en  $C$  en raison du terme quadratique qu'il comporte. Celui de type CACG est linéaire par morceaux. Pour les deux formes de tarification si le niveau de pluie est élevé ( $\pi = \pi_2$ ), l'agriculteur rationnel a intérêt à consommer une plus faible quantité d'eau car la fonction de production  $h$  est plus concave pour des valeurs de pluviométrie plus grande ( $h''(C + \pi_2) > h''(C + \pi_1)$ ) ce qui implique une productivité marginale décroissante.

Mais pour des valeurs faibles de consommation (au dessous d'un certain seuil), le prix marginal de l'eau pour le système de tarification CAEDS est inférieur au prix marginal de l'eau pour celui de type CACG. Dans ce cadre, l'agriculteur a donc plus intérêt à augmenter sa consommation sous le système tarifaire CAEDS.

Pour l'analyse de la situation de pluviométrie faible, on peut faire un raisonnement similaire. En effet, pour un niveau de pluie faible, la productivité marginale de l'eau d'irrigation est plus grande grâce à la concavité plus faible ( $h''(C+\pi_2) > h''(C+\pi_1)$ ). L'agriculteur a donc tendance à consommer une plus grande quantité d'eau quelque soit le système tarifaire.

Cependant, pour une consommation d'eau dépassant le seuil précédent, l'agriculteur aura intérêt à consommer une quantité moindre d'eau avec le système de tarification de la CAEDS où le prix marginal de l'eau est désormais plus élevé que celui de la CACG qui reste constant.

Cette propriété peut être intéressante pour un gestionnaire qui fait face à une contrainte de disponibilité de la ressource en cas d'été sec.

Le tableau suivant permet de comparer de manière synthétique les deux formes de tarification.

**Tableau 7:** Récapitulatif des résultats

	<b>Tarification CACG</b>	<b>Tarification CAEDS</b>
<b>Equilibre budgétaire</b>	Moins favorable	Plus favorable
<b>flexibilité</b>	Moins favorable	Plus favorable
<b>Profit de l'agriculteur</b>	Plus grand profit pour une même production agricole	Plus faible profit pour une même production agricole
<b>Consommation été humide ou sécheresse</b>	Ecart important	Consommation moins variable
<b>Capacité de prévision de la demande</b>	Meilleure anticipation de la demande	Moins bonne anticipation de la demande
<b>Acceptabilité</b>	Identique	

Nous entendons par flexibilité la capacité à satisfaire de manière simultanée plusieurs objectifs. La tarification de la CAEDS est plus favorable sur ce plan grâce à ses multiples degrés de liberté. En effet, [Tidball et Terreaux \(2008\)](#) montrent comment avec ce système de tarification les différents paramètres jouent pour garantir les différents objectifs.

## Conclusion

Nous avons étudié deux systèmes de tarification particuliers mis en œuvre par des compagnies d'aménagement en France. Ces systèmes de tarification, au-delà des objectifs traditionnels de la tarification (efficience, équité, couverture des coûts), cherchent à répondre à une autre dimension importante de celle-ci. Cette dimension est celle la recherche d'une certaine anticipation de la demande d'eau des irrigants. A travers une souscription préalable (réservation d'eau) en début d'été, le gestionnaire est capable d'éviter certaines difficultés de gestion liées à un déséquilibre soudain entre l'offre et la demande d'eau. Notre étude a été menée dans un cadre intégrant l'aléa climatique, ce contexte aléatoire jouant un rôle déterminant dans la gestion de l'eau d'irrigation. La méthode développée a consisté à utiliser principalement des sorties d'un modèle de croissance végétale (STICS) dans un modèle d'optimisation économique du comportement de l'agriculteur.

Nous avons montré que ces systèmes de tarification, qui sont flexibles grâce à des degrés de liberté dus au choix de la valeur donnée à différents paramètres, étaient capables de satisfaire les objectifs les plus courants de la tarification, et partant, les principes fondamentaux de la Directive Cadre Européenne sur l'Eau (Tidball et Terreaux; 2008). En outre, d'autres objectifs comme l'anticipation de la demande en eau sont rendus possibles. Rappelons que des systèmes de tarification de ce type sont effectivement appliqués en pratique.

En termes comparatifs, les résultats démontrent que les deux systèmes de tarification comportent plusieurs avantages relatifs. Pour une même production agricole, ils induisent l'agriculteur à consommer la même quantité d'eau en moyenne. Cependant, le système CACG permet de générer un profit plus important pour l'agriculteur. Le mode de tarification CAEDS permet par contre au gestionnaire de couvrir plus facilement ses dépenses. La tarification CAEDS a un autre avantage particulier : avec ce système l'agriculteur est amené à irriguer moins en année sèche et plus en année humide comparativement à l'autre système de tarification. Cette propriété est intéressante dans un objectif de stabilisation de la consommation d'eau, alors que la rareté de la ressource se manifeste surtout en années sèches, tandis que sa disponibilité n'est pas aussi restrictive en année humide. Enfin, le système de tarification CACG permet au gestionnaire une meilleure anticipation de la demande. En définitive le choix d'un système de tarification ou de l'autre dépendra fortement du poids relatif que le gestionnaire de la ressource alloue à chaque avantage.

Quand on considère un autre aspect très important étroitement lié aux aléas qui est l'attitude de l'agriculteur face au risque, nous montrons que les conclusions précédentes restent valables pour un agriculteur légèrement averse au risque. L'attitude vis-à-vis du risque n'a donc pas d'une manière globale un impact significatif sur les résultats obtenus.

Plus les impacts de la variabilité climatique sont importants, plus la mise en place d'instruments novateurs sont nécessaires pour assurer la survie des systèmes de production agricole en harmonie aussi bien avec les autres secteurs consommateurs de la ressource en eau qu'avec l'environnement. Un problème fondamental auquel devront faire face les décideurs dans les prochaines années est la gestion de différents risques et incertitudes (Just, 2003 ; Székely et Pálincás, 2009). Les systèmes tarifaires analysés contribuent à répondre à cette nécessité de développer des outils de gestion adéquats visant à réduire la vulnérabilité des exploitations agricoles. Dans le cas des systèmes étudiés ici, il est possible de sophistiquer éventuellement la tarification pour renforcer différents aspects positifs ou pallier certains défauts. Enfin on peut rendre les deux systèmes de tarification plus faciles à interpréter par les agriculteurs en les résumant par un tableau à double entrée (souscription et consommation).

## Références

Amigues, J P. Debaeke, P. Itier, B. Lemaire, G. Seguin, B. Tardieu, F. et Thomas, A. 2006. Sécheresse et agriculture. Réduire la vulnérabilité de l'agriculture à un risque accru de manque d'eau. Expertise scientifique collective. synthèse du rapport. INRA (France). 72 p.

Berbel, J. Calatrava, J. Garrido, A. 2008. Water Pricing and Irrigation: A Review of the European Experience. In: Molle, A. Berkoff, J. (Eds.) *Irrigation water pricing: the gap between theory and practice*. Oxfordshire: CABI pp 295-327. 15p.

Birol, E. Karousakis, K. Koundouri, P. 2006. Using economic valuation techniques to inform water resources management: A survey and critical appraisal of available techniques and an application. *Science of Total Environment*. 365. pp 105-122.

Brooks, R. Harris, E. 2008. Efficiency gains from water markets: Empirical analysis of Watermove in Australia. *Agricultural Water Management*. 95. pp 391-399.

Burt, C M. 2007. Volumetric irrigation water pricing considerations. *Irrigation and Drainage Systems*. 21. pp 133-144.

Cui, J. Schreider, S. 2009. Modelling of pricing and market impacts for water options. *Journal of Hydrology*. 371. pp 31-41

Easter, K.W., Liu, Y. 2007. Who pays for irrigation: cost recovery and water pricing? *Water Policy*. 3. pp 285-303

Elmahdi, A. Malano, H. Etchells, T. 2007. Using system dynamics to model water-reallocation. *Environmentalist*. 27. 3-12.

Elnaboulsi, J. 2008. An Incentive Water Pricing Policy for Sustainable Water Use. *Environmental and Resource Economics*. 4. pp 451-469.

European Environmental Agency (EEA). 2007. Climate change and water adaptation issues. EEA Technical report No 2/2007. Office for Official Publications of the European Communities. Luxembourg.

European Union. 2000. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the council of 23 October 2000. *Official Journal of the European Communities*. 22.12.2000. 72 p.

FAO. 2004. L'eau, l'agriculture et l'alimentation. 63p.

Fraiture, d, C. Wichelns, D. 2010. Satisfying future water demands for agriculture. *Agricultural Water Management*. 97. pp 502-511

Garcia, S. Reynaud, A. 2004. Estimating the benefits of efficient water pricing in France. *Resource and Energy Economics*. 26. pp 1-25.

Gleyses, G. Loubier, S. Terreaux, J P. 2003. Calcul du coût de l'eau d'irrigation. *La Houille Blanche*. 3. pp 102-106.

Groom B., T. Guille, T. Koundouri, P. Kountouris, I. Mousoulides, M. Nauges, C. Nocentini, L. Sarr, M. Terreaux, JP. 2006. Review of water pricing policies and the issues of political economy that surround the implementation of water pricing policies. E.U. Aquastress Project. Deliverable 3.5.1. 132 p.

- Guille T., Mousoulides, M. Koundouri, P. Kountouris, I. Mavrogenis, T. Mavrogenis, K. Vlachakis, N. Nocentini, L. Nikitas, P. Terreux JP. 2006. Review on the experience of economic instruments for water stress mitigation. Aquastress E.U. Project. Deliverable 3.6.1. 66 p.
- Holt, C A. Laury, S K. 2002. Risk aversion and incentive effects. *The American Economic Review*. 92. pp1644-1655.
- Hrovatin, N. Bailey, S J. 2002. Implementing the European Commission's water pricing communication : cross-country perspectives. *Utilities Policy*.10. pp 13-24
- Iglesias, E. Blanco, M. 2008. New directions in water resources management: The role of water pricing policies. *Water resources research*. 44. pp 1-11.
- Itier, B. 2008. Agriculture et sécheresse : le contexte et les enjeux. *Innovations Agronomiques*. 2. pp 1-8.
- Johansson, R C. 2000. Pricing irrigation water: A literature survey. *World Bank Policy Research Working Paper No. 2449*.
- Johansson R.C., Y. Tsur, T.L. Toe, R. Doukkali, A. Dinar. 2002. Pricing irrigation water: A review of theory and practice. *Water Policy*. pp 173-199.
- Just, R E. Pope, R D. 2002. The agricultural producer: Theory and statistical measurement. *in: Handbook of Agricultural Economics*. Gardner B., Rausser G.C. (eds), New York, Elsevier-North-Holland. pp 631-741.
- Just, R E. 2003. Risk research in agricultural economics: opportunities and challenges for the next twenty-five years. *Agricultural Systems*. 75. pp 123–159.
- Meza, F J. Silva, D. Vigil, H. 2008. Climate change impacts on irrigated maize in Mediterranean climates: Evaluation of double cropping as an emerging adaptation alternative. *Agricultural Systems*. 98. pp 21-30.
- Molle, F. 2009. Water scarcity, prices and quotas: a review of evidence on irrigation volumetric pricing. *Irrigation Drainage Systems*. 23. pp 43-58.
- Monteiro, H. 2005. Water pricing models: a survey. Department of Economics & Dinâmia – ISCTE. *Research Centre on Socioeconomic Change Working Paper No. 2005/45*.
- Moschini, G. Hennessy, D A. 2002. Uncertainty, risk aversion, and risk management for agricultural producers. *in: Handbook of Agricultural Economics*. Gardner B., Rausser G.C. (eds). New York. Elsevier-North-Holland. pp 89-153.
- Petrie, R A. Taylor, L O. 2007. Estimating the value of water use permits: A hedonic approach applied to farmland in the southeastern United States. *Land Economics*. 83. pp 302-318.
- Reynaud, A. 2008. Adaptation à court et à long terme de l'agriculture face au risque de sécheresse : Une approche par couplage de modèles biophysiques et économiques. *Revue d'Etudes en Agriculture et Environnement*. 90. pp 121-154.

Richard, R. Heim, JR. 2002. A Review of Twentieth-Century Drought Indices Used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*. 83. pp 1149-1165.

Rogers, P. De Silva, R. Bhatia, R. 2002. Water is an economic good: How to use prices to promote equity, efficiency, and sustainability. *Water Policy*. pp 1–17.

Rosegrant, M W. Cai, X. Cline, S A. 2002. *World Water and Food to 2025: Dealing with Scarcity*. International Food Policy Research Institute, Washington, D.C. 348p.

Székely, C. Pálkás, P. 2009. Agricultural Risk Management in the European Union and in the USA. *Studies in Agricultural Economics*. No 109. pp 55-72.

Terreaux, J P. Gleyses, G. Loubier, S. 2005. Définition du coût de l'eau d'irrigation : méthode et applications. pp 81-93. in Terreaux J.P. (Ed.) *Economie des Equipements pour l'eau et l'environnement*. Quae Editions. 208 p.

Thomas, A. Nauges, C. 2008. Instruments économiques de gestion de la ressource en eau. *Recherches en économie et sociologie rurales*. N° 4-5 - Septembre 2008.

Tidball, M., Terreaux, JP. 2008. Information revelation through irrigation water pricing using volume reservations. *Working paper LAMETA*. 13p.

Tsur, Y. Dinar, A. 1995. Efficiency and Equity consideration in pricing and allocating irrigation water. *World Bank. policy research working paper* 1460.

Tsur, Y. A. Dinar, R. Doukkali, and T. Roe. 2004. Irrigation water pricing: policy implications based on international comparison. *Environment and Development Economics*. pp 735-755.

Tsur, Y. 2005. Economic Aspects of Irrigation Water Pricing. *Canadian Water Resources Journal*. pp 31 - 46.

## ANNEXES

### Annexe A : Paramétrisation du module STICS

#### A.1 Paramétrisation des sols

Paramètres	Type de sol			
	type 1	type 2	type 6	type 11
Surface-layer clay content (%)	30.00	40.00	40.00	16.00
Organic nitrogen content in the soil moisture horizon (%)	0.12	0.10	0.10	0.12
Surface layer limestone content (%)	8.00	0.00	0.00	0.00
Albedo when dry	0.20	0.20	0.25	0.20
Soil evaporation accumulation during the potential phase (mm)	6.00	7.00	7.00	8.00
pH	7.80	6.60	6.00	6.80
Run-off coefficient (between 0 and 1)	0.00	0.00	0.00	0.00

#### A.2 Paramétrisation des itinéraires techniques

Région	Culture (variété)	Date de	Fertilisation
		semis	KgN ha <sup>-1</sup>
Toulouse	Maïs (Cécilia)	15/04	191 (1)

#### A.3 Paramétrisation du climat

Station	Année	Mois	Jour/mois	Jour/année	T° min	T° max	R	Etp
clima18	2004	7	23	205	19.9	28.0	13.4	3.5
clima18	2004	7	24	206	17.6	30.5	23.7	5.3
...	...	...	...	...	...	...	...	....
clima18	2004	7	26	208	14.6	28.5	25.7	5.5
clima18	2004	7	27	209	13.5	27.6	25.3	5.0

**Tableau A.3 : Extrait du fichier climatique pour l'année 2004.**

Les données climatiques dans le tableau précédent proviennent de la station météorologique de Toulouse (Clim18) pour laquelle nous disposons de 10 années d'historiques journaliers (de 1998 à 2007) pour lesquelles on observe notamment la température minimale (T° min), la température maximale (T° max), le rayonnement cumulé (R), l'etp Penman cumulé (Etp).



## Annexe B : Régression MCO et Optimisation

### Régression pour obtenir la fonction $f(x_1..x_2)$

Le modèle de la régression est le suivant :

$$F(x_1, \dots, x_T) = a_0 + \sum_{i=1}^T a_i x_i + \sum_{i=1}^T a_{(9+i)} x_i^2 + \sum_{j=2}^T \sum_{j>i} b_{i,j} x_i x_j + \varepsilon$$

Extrait de fichier de régression

Sol 6 année 2006

yield_u~2006	Coef.	Std. Err.	t	P> t	[95% Conf	. Interval]
X1	35.05777	2.071765	16.92	0.000	30.99198	39.12355
X2	40.05052	2.076987	19.28	0.000	35.97449	44.12656
X3	48.08238	2.093937	22.96	0.000	43.97308	52.19168
X4	40.70542	2.076472	19.60	0.000	36.63039	44.78044
X5	51.55275	2.025508	25.45	0.000	47.57775	55.52776
X6	68.59149	2.0994	32.67	0.000	64.47147	72.71151
X7	53.44288	2.016807	26.50	0.000	49.48495	57.40081
X8	21.58446	2.071525	10.42	0.000	17.51915	25.64978
X9	8.463471	2.056088	4.12	0.000	4.428451	12.49849
X1_2	-.1338383	.0305355	-4.38	0.000	-.1937634	-.0739132
X2_2	-.1936305	.0314693	-6.15	0.000	-.2553883	-.1318728
X3_2	-.1243999	.0314675	-3.95	0.000	-.1861541	-.0626456
X4_2	-.0228866	.0313934	-0.73	0.466	-.0844954	.0387222
X5_2	-.0564833	.0314349	-1.80	0.073	-.1181734	.0052068
X6_2	-.2812583	.0309433	-9.09	0.000	-.3419838	-.2205328
X7_2	-.2284896	.030509	-7.49	0.000	-.2883628	-.1686164
X8_2	-.163811	.0309277	-5.30	0.000	-.2245058	-.1031161
X9_2	-.0829631	.031387	-2.64	0.008	-.1445594	-.0213669
X1_X2	-.4042035	.0218628	-18.49	0.000	-.4471087	-.3612983
X1_X3	-.0296324	.0219178	-1.35	0.177	-.0726455	.0133807

La régression est significative au test de Fischer à 5% quel que soit le type de sol ou l'année. La plupart des coefficients sont significatifs au test de Student avec un seuil de confiance de 10%.

### Optimisation de la fonction

Un module d'optimisation a permis l'optimisation sous contrainte. Le tableau suivant présente un extrait du fichier résultat.

Dose d'irrigation	Rendements pour les années de 1998 à 2007 années									
	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007
0	4775	7476	4527	5480	6607	1006	3994	1014	2024	6547
25	5938,2	7997,9	4981,9	6087,5	7217,1	1052,2	4697,4	1584,2	3187,1	7266,8
50	6792,3	8251,4	5349,3	6595,5	7710,9	1114,5	5371,7	2454,5	3842,6	7899,9
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
.	.	.	.	.	.	.	.	.	.	.
175	9173,2	8424,4	6465,1	8161,0	9095,8	1738,7	7472,2	6905,2	6439,3	10111,4
200	9397,2	8430,3	6567,1	8308,3	9237,6	1930,3	7714,7	8358,0	6630,5	10336,2
225	9551,0	8442,6	6617,7	8424,2	9340,1	2175,9	7968,9	9583,5	6909,9	10525,1
250	9679,4	8451,5	6631,7	8526,7	9414,2	2488,5	8161,4	10251,8	7295,8	10613,0
275	9756,9	8455,9	6565,2	8571,4	9443,2	2840,6	8310,0	10771,4	7757,4	10683,6

Régression pour obtenir la fonction  $f(X) = \alpha_2(X + \alpha_3)^{\alpha_1}$

		1998	2000	2001	2002	2004	2006	2007
Sol 1	$\alpha_1$	0,42*	0,26*	0,42*	0,15	0,50*	0,44*	0,42*
	$\alpha_2$	773,77*	1504,24*	726,52*	4145,59	435,56*	632,91*	920,27*
	$\alpha_3$	14,04*	19,68*	15,95*	22,60	23,89*	13,70*	15,25*
Sol 2	$\alpha_1$	0,35*	0,21	0,28*	0,16	0,33*	0,32*	0,32
	$\alpha_2$	1415,52*	2153,57	1866,00*	4442,23	1302,61*	1756,33*	1795,81
	$\alpha_3$	8,07*	22,76	42,44*	25,78	22,99*	9,06*	55,98
Sol 6	$\alpha_1$	0,21	0,32	0,16	0,11	0,25*	0,36	0,23
	$\alpha_2$	3054,64	1004,48	3603,03	5760,20	2125,10*	1484,70	2983,69
	$\alpha_3$	20,60	192,05	38,49	36,10	22,83*	18,26	52,97
Sol 11	$\alpha_1$	0,27*	0,37	0,19	0,15	0,30*	0,55	0,29*
	$\alpha_2$	2248,30*	800,57	2971,83	4145,59	1471,22*	353,36	2080,95*
	$\alpha_3$	16,26*	125,05	24,09	22,60	24,88*	24,54	53,05*

\* le modèle passe le test de  $\chi^2$  à 5%.

Les données de l'année 2004 ont été retenues pour les différentes simulations. D'une part, cette année est une année normale (parmi les 6 années extrêmes) d'autre part le modèle passe le test de  $\chi^2$ , qui sert à tester l'hypothèse que la distribution observée est conforme à la forme fonctionnelle supposée, quelque soit le type de sol considéré.

Le prix de vente pour le maïs est pris égal à 14 euros par quintal.

### Annexe C : Estimation de la pluviométrie en année sèche ou en année humide

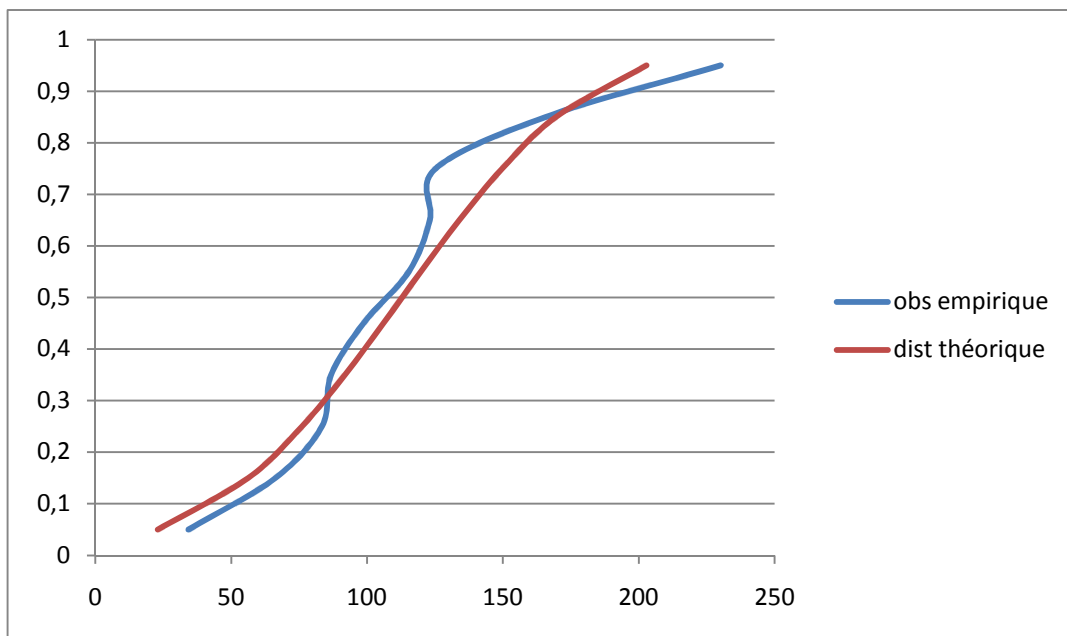
Une année est définie « sèche » si sa pluviométrie est inférieure ou égale à la valeur de la pluviométrie  $\pi_s$  dont la probabilité de non-dépassement est de  $\varphi$ . Plus  $\varphi$  est petit, plus cette valeur de pluviométrie est petite et plus les années sèches ont de faibles pluviométries.

Une définition de la sécheresse étant choisie (en fixant une valeur à la probabilité de non dépassement  $\phi$ ), il faut trouver la valeur de la pluviométrie  $\pi_s$  qui correspond. Il est donc nécessaire de connaître la loi de distribution de la pluviométrie. Nous supposons que la distribution de la pluviométrie est une loi normale, hypothèse que nous validons par un test de khi 2.

Années	2003	1998	2007	2004	2006	2002	2001	2000	2005	1999
Pluviométrie empirique	34,3	66,3	83,4	86,8	98,7	115,4	123,1	125,3	165,7	230,2
Fréquence empirique (méthode de Hazen)	0,05	0,15	0,25	0,35	0,45	0,55	0,65	0,75	0,85	0,95
Pluviométrie théorique	22,98	56,25	76,04	91,85	106,05	119,79	133,99	149,80	169,59	202,86

Moyenne : 112,92

Ecart type : 54,68



**Figure 1** : La distribution empirique comparée à la distribution théorique (loi normale de même espérance et de même écart-type)

L'ajustement à la loi normale est robuste au test de  $\chi^2$  à 1%. On peut donc utiliser cette distribution pour déterminer la valeur  $\pi_s$  de la pluviométrie qui correspond à la probabilité de non-dépassement  $\phi$ .

<b>Probabilité <math>\varphi</math> de non-dépassement</b>	0,05	0,1	0,2	0,25	0,5
<b>pluviométrie <math>\pi_s</math> correspondante</b>	23,0	42,8	66,9	76,0	112,9
<b>Pluviométrie moyenne</b>					
<b>Années sèches <math>\pi_1</math></b>	0	34,3	50,3	50,3	73,9
<b>Pluviométrie moyenne</b>					
<b>Années humides <math>\pi_2</math></b>	112,9	121,7	128,6	128,6	151,9

Toute année de pluviométrie inférieure à  $\pi_s$  est une année sèche.  $\pi_1$  est la pluviométrie moyenne des années sèches. De même toute année dont la pluviométrie est supérieure à  $\pi_s$  est une année humide et  $\pi_2$  représente la pluviométrie moyenne des années humides.

Les simulations montrent que les résultats sont pratiquement indépendants de la fréquence de sécheresse considérés.

### Sol de type 1

Probabilité d'année sèche	Mode de Tarification	Consommation en été sec (mm)	Consommation en été humide (mm)	Consommation moyenne (mm)	Profit de l'agriculteur (€/ha)	Gain agricole total (€/ha)	Revenu du gestionnaire (€/ha)
$\varphi=0,5$	CAEDS	206,84	189,03	197,93	783,70	1115,25	331,54
	CACG	235,55	157,55	196,55	891,39	1114,07	222,68
$\varphi=0,2$	CAEDS	212,41	193,36	197,17	784,08	1114,26	330,18
	CACG	259,25	180,95	196,61	920,04	1114,07	194,03
$\varphi=0,1$	CAEDS	216,38	194,45	196,64	784,40	1113,63	329,23
	CACG	275,25	187,85	196,59	911,62	1114,07	202,45

### Sol de type 2

Probabilité d'année sèche	Mode de Tarification	Consommation en été sec (mm)	Consommation en été humide (mm)	Consommation moyenne (mm)	Profit de l'agriculteur (€/ha)	Gain agricole total (€/ha)	Revenu du gestionnaire (€/ha)
$\varphi=0,5$	CAEDS	87,02	71,53	79,28	937,73	1071,02	133,29
	CACG	116,85	38,85	77,85	1019,44	1071,18	51,74
$\varphi=0,2$	CAEDS	91,97	74,54	78,03	938,59	1069,68	131,09
	CACG	139,59	61,29	76,95	982,34	1069,59	87,25
$\varphi=0,1$	CAEDS	95,62	75,00	77,07	939,23	1068,60	129,37
	CACG	155,20	67,80	76,54	986,65	1068,96	82,31

La consommation moyenne reste invariable quelque soit la valeur de  $\varphi$  considérée. Par contre la consommation en année sèche devient beaucoup plus importante pour une fréquence d'année sèche plus faible.

## Documents de Recherche parus en 2010<sup>1</sup>

- DR n°2010 - 01 : Arthur CHARPENTIER, Stéphane MUSSARD  
« Income Inequality Games »
- DR n°2010 - 02 : Mathieu COUTTENIER, Raphaël SOUBEYRAN  
« Civil War in a Globalized World: Diplomacy and Trade »
- DR n°2010 - 03 : Tamás KOVÁCS, Marc WILLINGER  
« Is there a relation between trust and trustworthiness? »
- DR n°2010 - 04 : Douadia BOUGHERARA, Sandrine COSTA (Corresponding author),  
Gilles GROLLEAU, Lisette IBANEZ  
« Can Positional Concerns Enhance the Private provision of Public  
Goods? »
- DR n°2010 - 05 : Véronique MEURIOT, Magali AUBERT, Michel TERRAZA  
« Une règle de décision pour les combinaisons d'attributs dans les  
modèles de préférence des consommateurs »
- DR n°2010 - 06 : Charles FIGUIERES, Solenn LEPLAY, Estelle MIDLER, Sophie  
THOYER  
« The REDD Scheme to Curb Deforestation : A Well-designed  
System of Incentives? »
- DR n°2010 - 07 : Mireille CHIROLEU-ASSOULINE, Sébastien ROUSSEL  
« Contract Design to Sequester Carbon in Agricultural Soils »
- DR n°2010 - 08 : Raphaële PRÉGET, Patrick WAELBROECK  
« What is the cost of low participation in French Timber  
auctions? »
- DR n°2010 - 09 : Yoro SIDIBE, Jean-Philippe TERREAUX, Mabel TIDBALL, Arnaud  
REYNAUD  
« Comparaison de deux systèmes de tarification de l'eau à usage  
agricole avec réservation et consommation »

---

<sup>1</sup> La liste intégrale des Documents de Travail du LAMETA parus depuis 1997 est disponible sur le site internet : <http://www.lameta.univ-montp1.fr>

**Contact :**

Stéphane MUSSARD : [mussard@lameta.univ-montp1.fr](mailto:mussard@lameta.univ-montp1.fr)

