

# Utilisation d'un modèle agro-économique pour la gestion de l'irrigation dans un contexte de rareté\*

Christophe BONTEMPS<sup>†</sup> et Stéphane COUTURE<sup>‡</sup>

8 octobre 1999

## Résumé

Cet article analyse la gestion optimale de l'eau à des fins d'irrigation en conditions de ressources en eau limitées et en univers certain ou incertain. Notre objectif est d'analyser la conduite tactique de l'irrigation d'un exploitant agricole. Nous explicitons les règles de calcul économique de l'exploitant agricole en univers aléatoire et leurs conséquences en matière de gestion tactique de l'irrigation dans un cadre dynamique. Il s'agit alors de définir des règles de conduite d'irrigation optimales d'un agriculteur en tenant compte d'une part, du risque climatique et d'autre part, de ses anticipations.

Cet article présente une nouvelle approche pour résoudre une classe de problèmes de décisions dynamiques sous incertitude. Nous développons un modèle économique dynamique ayant comme variable de contrôle l'eau d'irrigation à déterminer à chaque étape du processus de décision. Ce modèle intègre un module de simulation agronomique de croissance de la plante, EPIC. Il permet de dégager des règles de décisions quant aux problèmes auxquels fait face l'exploitant agricole pour définir sa conduite d'irrigation dans un univers certain ou incertain. En univers certain, nous avons déterminé la conduite d'irrigation optimale en fonction du scénario climatique choisi. Dans un univers incertain, le modèle propose des solutions de conduite à respecter tout au long de la campagne, en utilisant au mieux la ressource en eau en tenant compte du risque climatique, ou à tout stade du processus de décision, en fonction des décisions déjà prises et des anticipations faites par l'exploitant agricole. Ce dernier peut alors, à tout moment de la campagne, analyser les conséquences de ses décisions et ainsi, obtenir la conduite d'irrigation qui lui permettra d'atteindre un profit optimal. Notre modèle permet une meilleure gestion de l'eau et ainsi de réaliser des économies relativement importantes de la ressource.

---

\*Nous tenons à remercier Jean-Pierre Amigues, Jacky Puech, Maurice Cabelguenne, Philippe Debaeke et Nicole Bosc pour leurs conseils.

<sup>†</sup>ERNA et INRA, Université des Sciences Sociales de Toulouse, 21 allée de Brienne, 31000 Toulouse, France. Email : [bontemps@toulouse.inra.fr](mailto:bontemps@toulouse.inra.fr).

<sup>‡</sup>ERNA et GREMAQ, Université des Sciences Sociales de Toulouse, 21 allée de Brienne, 31000 Toulouse, France. Email : [scouture@toulouse.inra.fr](mailto:scouture@toulouse.inra.fr).

# 1 Introduction

De nombreux problèmes de décision se placent dans un cadre dynamique et incertain. Ces problèmes d'optimisation sous incertitude touchent divers domaines d'application en économie et en finance : croissance économique sous incertitude, investissement sous incertitude, règles de consommation et gestion de portefeuille mais aussi gestion de ressources naturelles et agricoles. Affectant le résultat final du processus de décision, l'incertitude est prise en considération par les agents économiques grâce à des anticipations sur un aléa futur.

Le problème abordé dans cet article porte sur la gestion optimale des ressources naturelles et agricoles, et plus précisément sur la ressource en eau utilisée à des fins agricoles. Avec le développement spectaculaire de la production agricole, l'agriculture est devenue une grande utilisatrice d'eau. Fortement développée depuis trente ans, l'irrigation est aujourd'hui le premier poste de consommation nette d'eau en France, avec environ 40% du total. Cette technique visant à accroître et surtout à régulariser les rendements d'une exploitation agricole, engendre des investissements coûteux qui sont parfois à capacité limitante. Elle permet aux exploitants agricoles de se couvrir contre le risque climatique et devient, de ce fait, un moyen d'assurance. La consommation accrue intervient essentiellement en période d'étiage et peut conduire localement à des conflits d'usage entraînant alors des restrictions d'eau allouée à l'irrigation. Face à ce contexte de rareté, l'eau pourrait être l'une des causes principales des conflits futurs. Car elle est la ressource la plus inégalement répartie dans le monde, moins de dix pays se partagent plus de 60% des réserves et la quantité disponible par habitant a diminué de 40% depuis 1970. Hier abondante, disponible et quasi-gratuite, l'eau est devenue une ressource rare, précieuse et disputée qu'il convient de gérer au mieux. De plus, le poids des contraintes économiques, la variabilité des ressources en eau disponibles et l'aléa climatique exigent une gestion de l'irrigation de plus en plus rigoureuse.

Au sein même du problème général de la gestion de l'irrigation au niveau de l'exploitation agricole, un nombre important de problèmes plus spécifiques peut être identifié. Il s'agit notamment de la gestion au niveau de la parcelle. L'allocation de l'eau d'irrigation, au cours d'une campagne, est un problème difficile à résoudre quand la ressource est rare. Il faut allouer " au mieux " une quantité d'eau fixée au cours de la saison une fois qu'une surface particulière de la culture a été décidée. Ce problème conduit à déterminer les dates d'irrigation et les quantités appliquées à chaque tour face au risque climatique. Ce problème est compliqué par le fait que les précipitations, dans un montant inconnu, contribueront, à satisfaire les besoins de la plante et par le fait que les besoins eux-mêmes de la plante ne sont pas parfaitement connus mais dépendent des conditions climatiques aléatoires. L'exploitant agricole, disposant d'une quantité d'eau totale à répartir, doit prendre plusieurs décisions précises. Il doit tout d'abord, décider des dates d'irrigation, puis choisir la dose à apporter ainsi que le nombre de tours d'eau. Ces trois problèmes, modulables, lui offrent un ensemble de choix très important, ses décisions étant irréversibles.

L'étude d'un calendrier d'irrigation optimal est un problème couramment abordé dans la littérature appliquée de différentes disciplines telles que l'économie, l'hydrologie ou l'agronomie. Il existe alors plusieurs méthodes pour analyser ce problème. Parmi les solutions classiquement retenues pour déterminer les choix de conduite d'irrigation, il est souvent fait appel à des mesures physiques, supposées représenter au mieux, à partir de mesures ponctuelles sur des surfaces limitées, l'ensemble des données nécessaires au déclenchement de l'irrigation. Des méthodes de mesure physique de la

teneur en eau<sup>1</sup> ou du potentiel hydrique<sup>2</sup> sont actuellement disponibles. Les mesures de teneur en eau peuvent se faire de façon directe par la méthode gravimétrique (séchage d'un échantillon de sol) ou de façon indirecte par des mesures nucléaires comme l'humidimétrie (basée sur une source radioactive émettant des neutrons dont l'énergie cinétique diminue à chaque collision avec d'autres atomes comme l'hydrogène) ou par des mesures diélectriques (la fonction diélectrique du sol dans le domaine des hautes fréquences électromagnétiques est fonction de la nature des constituants des sols). De même, le potentiel hydrique peut être mesuré par tensiométrie (capteur des charges hydrauliques dans le sol) ou psychrométrie (mesure de pression partielle de vapeur d'eau au sein d'une chambre à parois poreuses placée dans le sol). Ces méthodes, très techniques, nécessitent parfois des compétences bien précises. On peut cependant, en matière de conduite d'irrigation, concevoir la mise en oeuvre de modèles de simulation permettant de représenter divers scénarios d'évolution de la culture, compte tenu des choix faits, tout en incluant divers critères de variation. Des logiciels d'aide à la décision basés sur des modèles informatiques performants permettent de réaliser des choix par rapport à des contraintes. Les simulations ainsi réalisées permettent d'affiner les choix, d'évaluer l'impact des manoeuvres et de faciliter la prise de décision.

Il existe à l'heure actuelle de nombreux modèles d'aide à la décision à partir de la simulation du comportement des agriculteurs. Certains possèdent un module de simulation pour calculer le rendement des plantes selon divers modes de conduites de l'irrigation, comme par exemple le modèle LORA<sup>3</sup> développé par l'INRA (Leroy et Jacquin, 1994) et l'ITCF ou le modèle développé par G. Flichman à Montpellier utilisant le modèle EPIC<sup>4</sup>. Certains modèles sont spécifiquement orientés vers le choix de l'assolement en fixant les conduites d'irrigation (Deumier et al., 1996).

D'un point de vue pratique, de nombreuses études notamment agronomiques (Cabelguenne et al., 1993, 1994, 1995), fournissent des informations générales sur la conduite d'irrigation à suivre. Par exemple, pour le maïs dans la région sud-ouest de la France, tout retard d'irrigation durant le mois de juillet (période de floraison de la plante) a des conséquences irréversibles sur le rendement final. Cependant, l'exploitant agricole, disposant d'une quantité d'eau totale à répartir, doit prendre plusieurs décisions plus précises. Il doit tout d'abord, décider des dates d'irrigation, puis choisir la dose à apporter ainsi que le nombre de tours d'eau. Ces trois paramètres, substituables, lui offrent un ensemble de choix très important, ses décisions étant irréversibles.

Ce contexte relance la recherche sur l'utilisation optimale d'une quantité d'eau donnée. Il convient alors de fournir à l'exploitant un outil permettant de faciliter sa prise de décisions concernant sa conduite d'irrigation.

L'objectif de cet article est d'analyser la gestion optimale de l'eau à des fins d'irrigation en conditions de ressources en eau limitées et en univers certain ou incertain. Il s'agit de définir la conduite tactique de l'irrigation d'un exploitant agricole dans un environnement certain ou incertain. Nous explicitons aussi les règles de calcul économique de l'exploitant agricole en univers aléatoire et leurs conséquences en matière de gestion tactique de l'irrigation dans un cadre dynamique.

Nous proposons une nouvelle approche pour résoudre une classe de problèmes de décisions dynamiques sous incertitude. Nous développons un modèle économique dynamique ayant comme variable

---

<sup>1</sup>La teneur en eau est la quantité d'eau contenue dans le sol ; c'est une variable d'état qui quantifie l'état hydrique d'un sol.

<sup>2</sup>Le potentiel hydrique rend compte de l'état de liaison de l'eau avec le sol ; c'est la variable d'état responsable des transferts d'eau dans le sol ou du sol vers la plante.

<sup>3</sup>LORA : Logiciel d'Optimisation et de Recherche d'Assolement est un logiciel d'aide au choix d'un assolement de grandes cultures sur la sole irrigable d'une exploitation agricole.

<sup>4</sup>Erosion Productivity Impact Calculator

de contrôle l'eau d'irrigation à déterminer à chaque étape du processus de décision. Ce modèle permet de dégager des règles de décisions quant aux trois problèmes auxquels fait face l'exploitant agricole pour définir sa conduite d'irrigation. Le problème dynamique intra-saisonnier de conduite d'irrigation est formulé comme un problème de décisions multi-étapes. Nous avons programmé un modèle économique pour déterminer le sentier d'allocation intra-saisonnier optimal dans un environnement certain ou aléatoire, incorporant le modèle agronomique EPIC (Erosion Productivity Impact Calculator) choisi pour ces différentes performances. La plupart des logiciels pour la gestion de l'irrigation utilisent soit les fonctions de production de Doorenbos et Kassam (1979), soit les formules climatiques. Cependant, ces modèles, n'intégrant pas de processus dynamique, ne permettent pas de prévoir correctement les effets d'une contrainte hydrique sur le cycle de croissance des plantes. A la différence, les modèles mécanistes agronomiques à pas de temps journalier tel que EPIC<sup>5</sup>, sont en mesure de simuler les effets d'un déficit hydrique tout au long du cycle cultural. Ils peuvent aussi être utilisés comme outil de prévision des états hydriques de la culture et du sol sur la base de simulations du fonctionnement de ces derniers. Toutefois, ces logiciels doivent être parfaitement étalonnés et validés pour les sites étudiés. A l'aide de données provenant d'un dispositif expérimental de longue durée réalisé par la station d'agronomie de l'INRA Toulouse, le modèle EPIC a été étalonné et validé à Toulouse (Cabelguenne et al, 1995). Plus précisément, le logiciel de modélisation et de simulation de croissance des cultures EPIC-Phase temps réel, développé par la station d'agronomie de l'INRA Toulouse, a été utilisé. Il s'agit d'une extension du modèle originel EPIC, modèle global et photosynthétique avec un fonctionnement pluri-annuel et pluri-espèce à pas de temps journalier. Il développe le module hydrique en incorporant la prévision dynamique de l'eau dans le système sol-plante et des effets des contraintes hydriques sur la production. Nous avons construit des outils de simulations facilitant l'analyse et l'aide à la décision de la conduite d'irrigation. Ces outils évaluent l'impact des décisions de l'exploitant agricole sur la production finale.

Nous avons utilisé ce modèle économique pour définir des règles de décision d'irrigation soit dans un univers certain, soit dans un univers incertain. En univers certain, l'exploitant agricole a connaissance du climat ou identifie l'avenir climatique à un scénario donné. A cet effet, La variabilité climatique est appréhendée par un ensemble de scénarios climatiques choisis parmi les années disponibles, établis à partir des relevés météorologiques des années passées. Nous avons déterminé la conduite d'irrigation optimale en fonction du scénario climatique choisi. Dans un univers incertain, le modèle simule et propose des règles de conduite d'irrigation étant donné le risque climatique. Il propose des solutions de conduite à respecter tout au long de la campagne, en utilisant au mieux la ressource en eau en tenant compte du risque climatique. Il permet d'analyser les choix envisagés par l'exploitant agricole ainsi que les conséquences de modifications de variables incertaines telles que les conditions climatiques, les ressources en eau. Il est également en mesure de fournir des conduites types d'irrigation à suivre dans un contexte d'incertitude climatique, à tout stade du processus de décision, en fonction des décisions déjà prises et des anticipations faites par l'exploitant agricole. Ce dernier peut alors, à tout moment de la campagne, analyser les conséquences de ses décisions et ainsi, obtenir la conduite d'irrigation qui lui permettra d'atteindre un rendement optimal.

Notre modèle permet ainsi de réaliser des économies relativement importants de la ressource, conduisant alors à une meilleure gestion de l'eau. Par exemple, pour un scénario climatique donné, la quantité d'eau totale pour la conduite optimale est environ 4 fois plus faible que le total des apports recommandés par les agronomes. L'exploitant agricole peut alors réaliser, par un objec-

---

<sup>5</sup>On peut également citer les logiciels CERES-MAIZE (Jones et Kiniry, 1986) et CROP SYSTEM (Stockle et al., 1994).

tif de production économiquement optimal inférieur au rendement potentiel et par une répartition optimisée du volume de ressource disponible, des marges de profit supérieures. Les principes de conduites délivrées par le modèle permettent de gérer de façon optimale la ressource en eau limitée, et de préserver au mieux la ressource en luttant contre les gaspillages.

Cet article est organisé comme suit. Le modèle simulé ainsi que la méthodologie de résolution numérique sont exposés à la section 2. La section 3 est consacrée aux hypothèses de travail faites pour réaliser les simulations. On examine en détail les résultats à la section 4. On conclut brièvement à la section 5.

## 2 Le modèle simulé et la procédure de résolution

Dans notre modèle, seul le problème intra-saisonnier de conduite d'irrigation est abordé, l'aspect inter-saisonnier étant alors évacué. Il s'agit, par conséquent, pour l'exploitant agricole, de définir les applications d'eau successives au cours de la saison. Nous avons opté pour une approche numérique pour résoudre ce problème. Le modèle dynamique est résolu par simulations exhaustives de l'ensemble des cas possibles.

### 2.1 Le modèle simulé

Le modèle simulé est rendu opérationnel par la discrétisation de certaines variables.

#### 2.1.1 La variable d'état

La matière sèche,  $X_t$ , est calculée par un modèle agronomique. Sa dynamique  $f_t(.)$  est une fonction complexe qui dépend globalement d'une part, des conditions climatiques et de l'humidité du sol, et d'autre part, d'un facteur stress hydrique ou azoté. Modélisée par une équation de type non linéaire, cette relation est générée dans le modèle agronomique. Chaque jour, la croissance de la plante est simulée par ce dernier, de la façon suivante : la quantité de matière sèche potentiellement élaborée est calculée en fonction de la surface foliaire de la veille et des variables météorologiques du jour. Ensuite, sont calculées les ressources du milieu nécessaires pour satisfaire cette croissance (eau, azote, phosphore). Pour chacune de ces ressources, des taux de satisfaction des besoins que l'on appelle facteur stress sont élaborés. Le minimum des taux ainsi calculés est considéré comme le facteur limitant et devient le stress du jour. La croissance réelle de la matière sèche est alors évaluée en tenant compte de cet indice.

#### 2.1.2 La variable de décision

Les variables de décision sont la décision d'irriguer ou non à chaque période :  $d_1, \dots, d_T$ , supposée au maximum égale à 5 tours possibles<sup>6</sup>, ainsi que la quantité d'eau apportée à chaque décision :  $q_1, \dots, q_T$ . Cette quantité est soumise à une contrainte :  $\underline{q} \leq q_t \leq \bar{q}$ . De plus, la somme des quantités d'eau apportées à chaque étape doit être inférieure à la quantité totale disponible au cours de la campagne :  $Q$ .

---

<sup>6</sup>Les pratiques culturales observées dans la région étudiée montrent qu'en moyenne, le nombre d'arrosages est égal à 5 ou 6.

La conduite d'irrigation,  $s$ , est alors un vecteur de décisions :  $\{d_1, \dots, d_T; q_1, \dots, q_T\}$  qui vérifie un ensemble de contraintes :

$$s \in S$$

$$S : \begin{cases} \sum_{t=1}^T d_t q_t \leq Q \\ \underline{q} \leq q_t \leq \bar{q} \\ \sum_{t=1}^T d_t = 5 \end{cases}$$

### 2.1.3 Les périodes et les étapes du processus de décision

La campagne d'irrigation est divisée en 10 périodes correspondant à des intervalles d'irrigation prédéterminés. Il apparaît alors 10 étapes dans le processus de décision. Le problème de l'exploitant agricole est de décider d'irriguer ou non à chaque étape sachant que le calendrier de l'irrigation est donné. Le nombre d'apports d'eau durant la campagne est fixé à 5<sup>7</sup>.

Les périodes et étapes du processus de décision au cours de la campagne sont représentées selon la figure 1 et sous forme d'un arbre de décisions (figure 2).

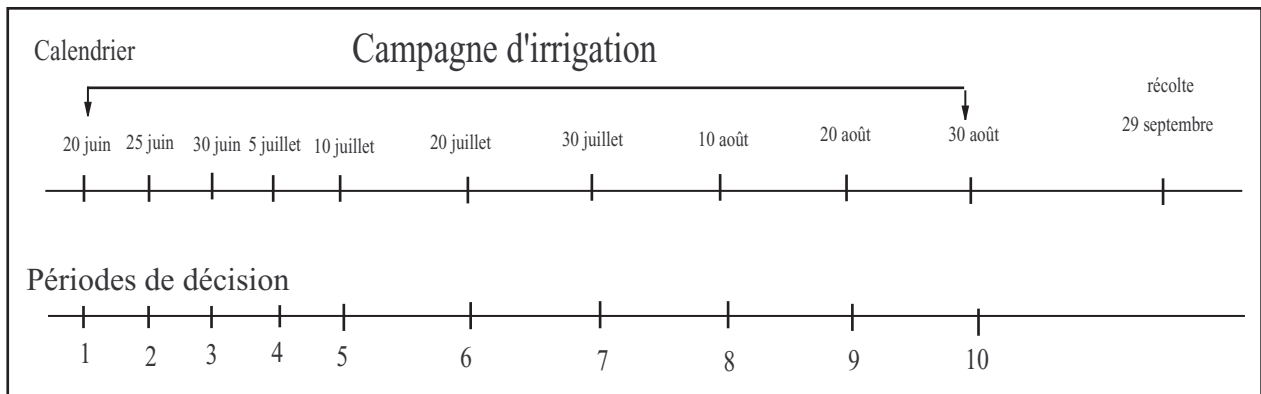


FIG. 1: Périodes et étapes du processus de décision.

### 2.1.4 La fonction objectif

L'objectif de l'exploitant agricole est de maximiser le profit qui est une fonction du rendement à la récolte et des coûts.

<sup>7</sup>Selon Cabelguenne et al., 1993, la stratégie prédéfinie avec la version Epic-phase temps réel sur la période de 1970 à 1989, consistait en 5 apports de  $200 \text{ m}^3/\text{ha}$  aux dates du 1, 5, 10, 20 et 25 juillet, pour la région toulousaine.

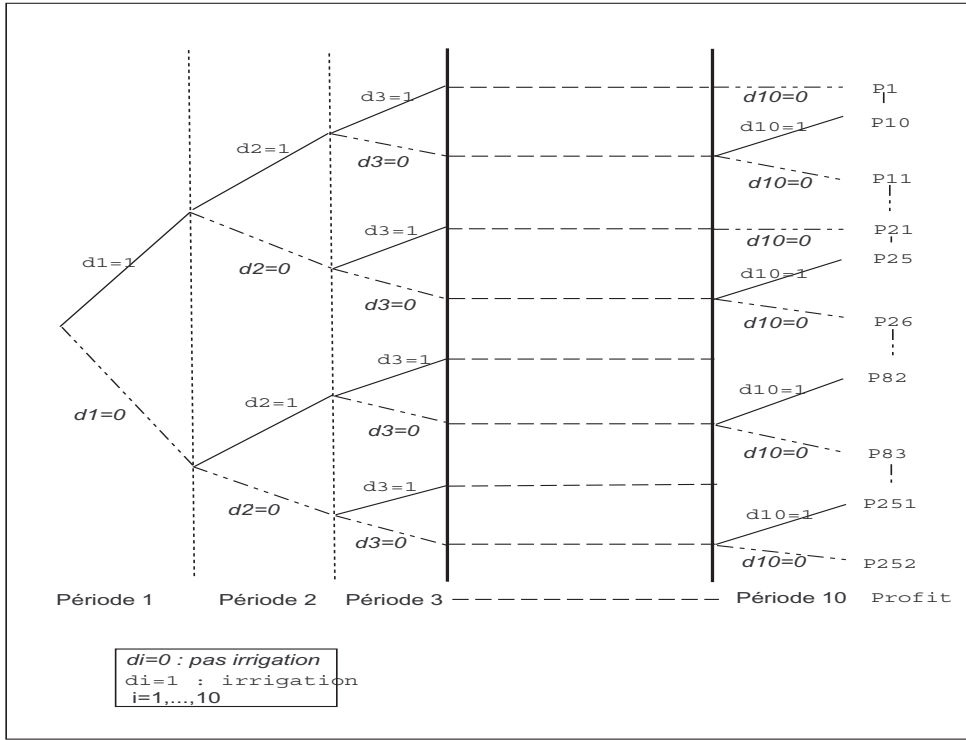


FIG. 2: Schématisation de l'arbre de décisions de la conduite d'irrigation.

Le rendement à la récolte dépend, d'une part, du climat,  $c$ , supposé ici connu, et d'autre part, de l'eau apportée par l'irrigation,  $q$ . Le rendement final calculé uniquement à la récolte, soit à la date  $T$ , s'écrit de la façon suivante :

$$Y_T(q_1, \dots, q_T, d_1, \dots, d_T, c_1, \dots, c_T; \theta)$$

avec

- $q_1, \dots, q_T$  : la quantité d'eau apportée aux dates  $1, \dots, T$
- $d_1, \dots, d_T$  : la décision d'irrigation aux dates  $1, \dots, T$  représentée par une variable binaire
- $c_1, \dots, c_T$  : le climat aux dates  $1, \dots, T$
- $\theta$  : la variable exogène regroupant l'ensembles des données fixes : le sol, le climat avant la campagne, les caractéristiques culturales et techniques.

Il convient alors de spécifier une forme à la fonction de production de la culture (Burt et Stauber, 1971 ; Yaron et Dinar, 1982 ; Tsakiris et Kiountouzis, 1984, Yaron et al., 1987 , Rao et al., 1990) qui doit être estimée de façon empirique. Cependant, comme le souligne Dudley et al. (1971), les conduites d'irrigation optimales sont sensibles aux changements des hypothèses biologiques faites dans le modèle. Ceci souligne l'importance des données expérimentales sur lesquelles sont fondées les hypothèses. C'est pourquoi la spécification de la fonction de production est un élément déterminant dans la définition de la conduite optimale. Il faut alors, de préférence, faire appel à un modèle de simulation de croissance de la plante et d'humidité du sol (Dudley et al., 1971 ; Mc Guckin et al.,

1987) qui estime le rendement ainsi que la variable d'état à chaque étape.

Les coûts se décomposent en un terme variable,  $c(s)$ , qui dépend de la séquence de décisions, supposé linéaire en la quantité d'eau, et en un terme fixe,  $CF$ .

Le problème est la maximisation du profit au niveau d'une parcelle en jouant sur la répartition temporelle d'un volume d'eau fixé, étant donnée l'année climatique considérée.

Le problème s'écrit alors :

$$\begin{aligned} \text{Max}_{\{s\}} \{pY_T(s; c_1, \dots, c_T, \theta) - (c(s) + CF)\} \\ s/c : \quad s \in S \end{aligned}$$

### 2.1.5 La prise en compte de l'incertitude

Le climat et plus particulièrement les précipitations à chaque période est une variable aléatoire affectant la dynamique de formation du rendement final. Les variables aléatoires sont supposées indépendantes et identiquement distribuées par la fonction de répartition  $G(\cdot)$ .

L'exploitant agricole n'a pas connaissance des conditions climatiques futures au moment de prendre sa décision. Il peut simplement émettre des anticipations sur ces variables et les incorporer dans son raisonnement.

La variabilité climatique est représentée à l'aide de relevés météorologiques des années antérieures réalisés sur le site expérimental. Chaque année est considérée comme un scénario climatique. L'ensemble de ces scénarii climatiques est un outil de prévision du risque climatique.

Le critère du décideur devient alors l'espérance de profit.

Le problème de décision s'écrit dans ce cas : à la date  $t$

$$\begin{aligned} \text{Max}_{\{s\}} \left\{ \int_0^{\bar{c}} (pY_T(s; \tilde{c}_t, \dots, \tilde{c}_T, \theta) - (cs + CF)) dG(\tilde{c}_t) \dots dG(\tilde{c}_T) \right\} \\ s/c : \quad s \in S \end{aligned}$$

## 2.2 La procédure algorithmique de résolution

Notre objectif est de fournir des outils facilement utilisables par l'exploitant pour l'aider à réaliser sa conduite d'irrigation en prenant en considération ce programme.

L'approche utilisée dans cet article consiste à lier un modèle agronomique de simulation du processus de croissance de la culture permettant de prévoir le rendement de la culture pour différents niveaux d'inputs, avec le modèle d'optimisation dynamique précédemment décrit afin d'optimiser les décisions d'irrigation pour une culture donnée au cours d'une campagne.

Le modèle agronomique estime le rendement en fonction de l'ensemble des caractéristiques du problème, la biomasse cumulée, l'indice foliaire, et utilise le stress hydrique pour calculer la biomasse réelle. L'output du modèle de simulation agronomique est utilisé comme input dans le modèle d'optimisation dynamique.

Le modèle d'optimisation dynamique détermine les applications d'eau journalières afin de maximiser le profit final sous l'ensemble des contraintes. Il utilise le simulateur de culture pour prédire les rendements pour différentes stratégies d'irrigation. Au final, il identifie la stratégie d'irrigation



optimale en considérant l'ensemble des profits simulés.

Notre démarche consiste à utiliser un modèle pour simuler le comportement de la culture, jour par jour, en fonction de différents scénarios (climat, types de sols, itinéraires techniques,..). Nous avons opté pour le modèle EPIC-Phase temps réel.

### **2.2.1 Le modèle EPIC-Phase temps réel**

Le modèle EPIC-Phase temps réel a été développé par la station d'agronomie INRA Toulouse à partir du modèle EPIC. Il vise à remédier aux carences du modèle original relatives à la prévision de la dynamique de l'eau dans le système sol-plante et des effets des contraintes hydriques sur la production, en intégrant le découpage du cycle de croissance en phases phénologiques de sensibilité différentes aux stress hydriques et azotés.

Fonctionnant à pas de temps journalier, c'est un modèle pluri-espèce et pluri-annuel qui permet de simuler la croissance de cultures en fonction de l'évolution des stocks d'eau et d'éléments minéraux du sol. Il décrit les principales relations régissant le système sol-climat-technique-plante. Ce modèle calcule la biomasse aérienne qui, à la récolte, est convertie par un indice de récolte, en rendement. A chaque pas de temps, il calcule la biomasse potentielle qui peut être diminuée en biomasse réelle si la plante subit un stress au cours de la période.

Le modèle Epic phase temps réel génère, pour un scénario climatique et pour un itinéraire technique donnés, le rendement à la récolte.

Pour aider l'exploitant agricole à choisir sa conduite d'irrigation, il faut lui fournir un outil lui permettant de générer, de façon automatique, l'impact de ces décisions sur le rendement final. Cette boucle de simulations a engendré la création de plusieurs outils de programmation.

### **2.2.2 Le lien entre les deux modèles**

La seconde composante de notre programme est un modèle d'optimisation de conduite d'irrigation pour la parcelle. Basé sur un algorithme décrivant l'ensemble des possibilités, la formulation du modèle est conceptuellement similaire à un algorithme de programmation dynamique car d'une part, le processus d'obtention de la solution est basé sur une analyse de tous les cas possibles de façon récursive, et d'autre part, ce processus peut être étudié à tout stade de la séquence de décisions. Ce programme a nécessité la conception d'un ensemble de sous-programmes ayant comme module le modèle agronomique, et plus précisément les résultats issus de ce modèle qui sont ensuite exploités.

De par le nombre important de cas possibles, nous avons procédé à des restrictions quant à la dose apportée à chaque tour d'eau. Nous l'avons fixé uniforme, rendant de ce fait le nombre de cas analysés limités à 252 possibilités. Cette hypothèse restrictive n'est pas totalement irréaliste dans le sens où il est observé dans la pratique que chaque fois qu'un exploitant irrigue, sa décision est plus du type irriguer ou ne pas irriguer, la dose apportée étant généralement fixée par la capacité d'irrigation de l'exploitation agricole. Cette hypothèse rend alors notre approche techniquement réalisable.

## 3 Les hypothèses de travail

### 3.1 Le contexte

L'agriculture est une activité à risques : risque technique (adaptation des semences, des pratiques agricoles), risque commercial (variation des prix engendrés par les fluctuations de l'offre) et surtout risque climatique contre lequel l'exploitant agricole cherche à se prémunir.

Elle est soumise aux événements climatiques. L'irrigation est une des façons de répondre aux aléas climatiques mais c'est une solution qui a un coût et qui peut être aussi soumise à des contraintes de ressource en eau.

Les dernières sécheresses consécutives montrent la fragilité du système actuel, surtout au niveau de l'exploitation agricole. Elles ont montré que l'eau était devenue une ressource rare et fragile, nécessitant une gestion rigoureuse. Elles ont de plus, accentué les conflits d'usage.

La sécheresse est un risque climatique qui n'est pas assurable. Certaines sécheresses ont engendré des mesures administratives d'interdictions ou de limitations d'irriguer avant la fin de la campagne afin de garantir l'alimentation en eau potable. L'enjeu économique d'une telle décision est important pour l'exploitant agricole : la décision administrative peut provoquer une perte de récolte conséquente. Ce type de réglementation n'est pas optimal. Il faut, par conséquent, dans un contexte de rareté, aider l'exploitant agricole à mieux gérer au niveau de la parcelle la quantité d'eau dont il dispose au cours de la campagne en lui fournissant les meilleures décisions d'utilisation de la ressource en eau disponible.

Les simulations de cet article se basent sur des données numériques se référant à la région sud-ouest de la France. Cette région délimitée par le bassin hydrographique de la Garonne voit l'agriculture représenter le premier poste de prélèvements d'eau et les deux tiers des consommations nettes sur l'année et même jusqu'à 85% des prélèvements en période d'étiage. Elle est souvent citée comme zone où les conflits autour de la ressource en eau sont importants. L'irrigation de cette zone est récente et caractérisée par une part importante de grandes cultures comme le maïs. Les besoins d'irrigation varient de façon importante en fonction des données climatiques ce qui soulève de nouveaux problèmes. L'eau nécessaire pour l'irrigation, essentiellement par aspersion<sup>8</sup>, est prélevée surtout en rivière, de façon individuelle ou collective, réalimentée artificiellement par des réserves de haute montagne.

### 3.2 Les données nécessaires

Les hypothèses de travail nécessaires pour réaliser les simulations de croissance des cultures sous contraintes hydriques sont regroupées principalement dans les fichiers de données nécessaires à la simulation pour EPIC. Elles fixent les paramètres du sol, de l'érosion, du climat, des itinéraires techniques (hors irrigation) et des conduites d'irrigation ainsi que la culture étudiée.

#### 3.2.1 Les données générales

Le périmètre irrigable et le sol : on s'intéresse uniquement à une parcelle de l'exploitation agricole donnée. Les caractéristiques du sol sont répertoriés dans le fichier de données nécessaires à EPIC générées par expérimentation sur le site expérimental d'Auzeville. Il s'agit d'un des trois sols

---

<sup>8</sup>Le mode d'irrigation le plus répandu dans la région est l'aspersion avec 65,6 % des installations, avec comme matériel, l'enrouleur pour 65,3 %.

caractéristiques de la région retenue. C'est un sol profond argilo-sableux, de profondeur de 1,60m, avec une réserve utile importante, égale à 300 mm environ.

La culture sélectionnée pour les simulations est le maïs, de par son importance relative dans la zone étudiée. Les itinéraires techniques hors irrigation : un calendrier type des opérations culturales hors irrigation a été réalisé à l'aide des recommandations des agronomes de l'INRA ainsi que de l'observation des pratiques des exploitants de la région et considéré comme optimisé<sup>9</sup> (figure 3). Il n'y a pas de rotation culturale sur plusieurs années.

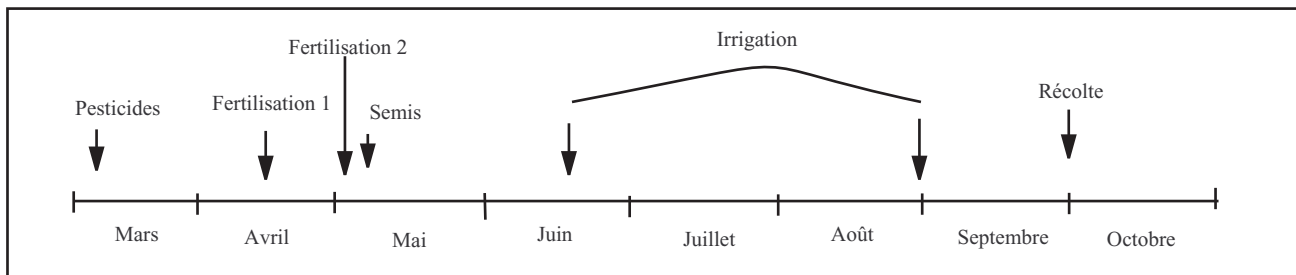


FIG. 3: Itinéraires techniques types pour la culture de maïs.

La quantité d'eau totale disponible au cours de la campagne : cette quantité peut être due à deux types de contraintes : la contrainte institutionnelle qui provient des risques de pénurie en période d'étiage et de sécheresse et la contrainte technique qui est due à l'installation d'irrigation ainsi qu'à l'organisation de l'utilisation de la ressource. L'installation d'irrigation est définie par le volume d'eau disponible pour irriguer (en  $m^3$ ) ainsi que par sa capacité par tour caractérisée par une quantité minimale et une quantité maximale par apport.

Les données économiques : Le profit de l'exploitant se définit comme la différence entre le produit de la récolte (prix\*rendement) et les coûts. Le prix de marché du maïs dans la région étudiée est en moyenne, de 1440 F/tonne. Ce prix de marché est connu pour chaque année. Les coûts totaux comprennent un terme variable lié à la consommation et un terme fixe lié aux autres frais. Les coûts fixes regroupent les frais d'engrais (750 F/ha), de semences (750 F/ha), de phytosanitaires (450 F/ha) et d'assurance grêle (200 F/ha) ; ils sont chiffrés à 2150 F/ha. Les coûts variables sont fonction du coût marginal du  $m^3$  de la ressource évalué à 0,25 F/ha.

### 3.2.2 Les paramètres

Le climat : Pour appréhender la variabilité climatique, le modèle utilise les relevés météorologiques des années antérieures de la station agronomique d'Auzeville. Chacune des années est considérée comme un scénario climatique possible pour la campagne à venir. Nous disposons d'un fichier de 14 années climatiques de 1983 à 1996 contenant les relevés journaliers observés. Il couvre l'ensemble des situations climatiques possibles dans la région. Il permet d'étudier les problèmes de risque climatique pour la production.

Le calendrier d'irrigation : la conduite est répartie de mi juin à fin août, mois qui correspondent aux périodes de floraison et de remplissage des grains. Elle est constituée de tours d'eau espacés

<sup>9</sup>Par exemple, nous avons fixé la date de semis le 02 mai car pour environ 50 % des superficies en maïs grain de la région, la date de semis est comprise entre le 01 et 10 mai.

de 5 à 10 jours, avec des doses variant de 20 à 80 mm. Ce calendrier résume le comportement des agriculteurs limités en ressources disponibles, ce qui interdit des apports plus précoces en phase végétative, au profit des périodes plus sensibles à l'eau.

Une fois tous ces éléments définis, le problème de l'exploitant agricole est de décider, étant donné un calendrier d'irrigation pré-déterminé, d'irriguer ou pas.

## 4 Les résultats

### 4.1 Les résultats dans un cadre certain

#### 4.1.1 L'optimisation de la conduite d'irrigation pour un scénario climatique donné

Pour un scénario climatique donné, le modèle permet de donner la conduite d'irrigation, à quantité d'eau totale limitée, qui maximise le profit final.

Nous avons sélectionné comme scénario climatique l'année 1989, dite "sèche" de par la pluviométrie annuelle faible (402,5 mm)<sup>10</sup> avec une répartition durant la campagne d'irrigation décrite par la figure 4.

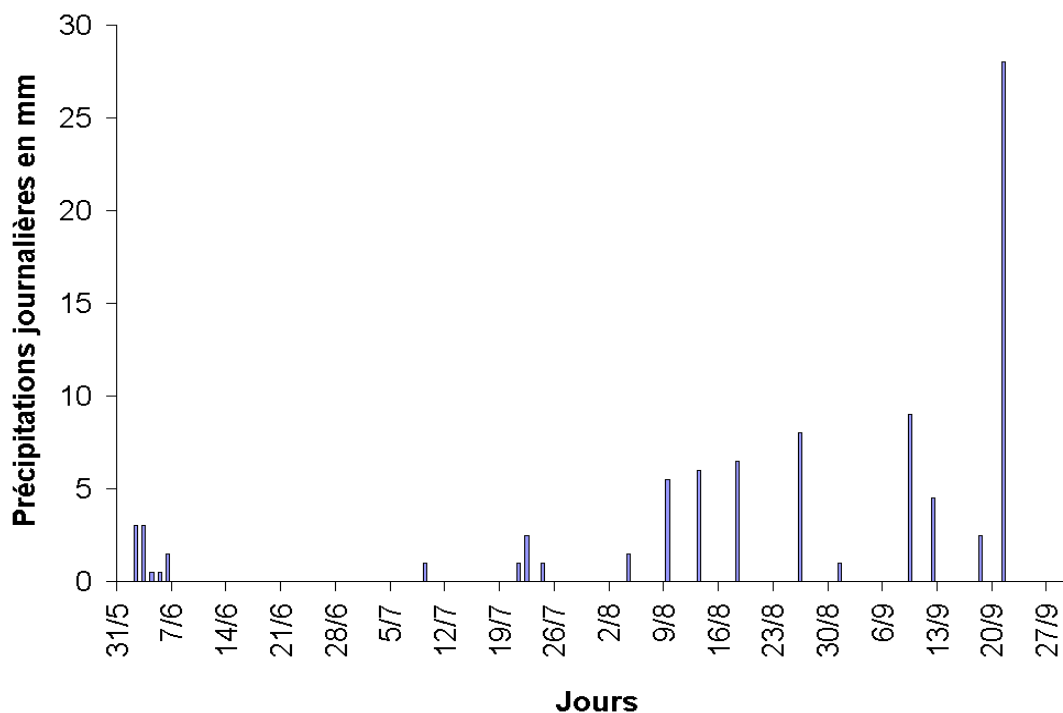


FIG. 4: Précipitations journalières exprimées en mm pour la campagne d'irrigation de l'année 1989.

Les simulations réalisées avec ce scénario montrent l'impact du climat dans la définition de la

<sup>10</sup>La pluviométrie moyenne dans la région est de 666 mm.

conduite d'irrigation optimale<sup>11</sup> (figure 5) pour une quantité d'eau totale disponible fixée à  $1500 \text{ m}^3/\text{ha}$ <sup>12</sup> et soulèvent l'influence du risque climatique sur le rendement (tableau 1) et le profit à la récolte (tableau 2).

	année sèche : 1989
Rendement en sec en T/ha	7,32
Rendement potentiel en T/ha (Quantité d'eau nécessaire en $\text{m}^3/\text{ha}$ )	12,90 (4970)
Rendement obtenu pour la conduite d'irrigation optimale avec $1500 \text{ m}^3/\text{ha}$ en T/ha	11,63
Ecart de rendement potentiel et en sec en T/ha	5,58
Ecart de rendement potentiel et optimal 1500 en T/ha (écart de quantité en $\text{m}^3/\text{ha}$ )	1,27 (3470)

TAB. 1: Rendements simulés pour le scénario climatique 1989, en sec, potentiel et avec la conduite optimale.

	année sèche : 1989
Profit en sec en Frs/ha	5529
Profit potentiel en Frs/ha	10141
Profit optimal pour un volume disponible de $1500 \text{ m}^3/\text{ha}$ en Frs/ha	9676
Ecart de profit potentiel et en sec en Frs/ha	4612
Ecart de profit potentiel et optimal 1500 en T/ha	465

TAB. 2: Profits simulés pour le scénario climatique 1989, exprimés en Frs/ha.

Pour ce scénario climatique, les besoins en eau théoriques de la plante,  $4970 \text{ m}^3/\text{ha}$ , représentent la quantité dont doit disposer la plante pour satisfaire ses besoins à l'ETM<sup>13</sup> sur l'ensemble de la campagne. Cependant, même pour une culture valorisant aussi bien l'eau que le maïs, il est possible d'obtenir un rendement ( $11,63 \text{ T/ha}$ ) proche du rendement potentiel<sup>14</sup> ( $12,90 \text{ T/ha}$ ) avec un volume d'eau très inférieur à celui requis pour satisfaire les besoins à l'ETM ( $4970 \text{ m}^3/\text{ha}$ ). Il importe seulement que le volume disponible ( $1500 \text{ m}^3/\text{ha}$ ) soit convenablement réparti au cours de la campagne (figure 5).

Dans l'hypothèse d'une gestion optimale du volume d'eau dont il disposait en début de campagne, l'exploitant agricole peut espérer obtenir à l'issue de l'année, un écart de profit relativement faible,  $465 \text{ F/ha}$  pour une économie de ressource en eau nécessaire de  $3470 \text{ m}^3/\text{ha}$ . Le tableau 2 montre que

<sup>11</sup>La conduite d'irrigation est dite optimale ou maximale si elle dégage, parmi les 252 cas possibles, le rendement ou le profit le plus important.

<sup>12</sup>Cette quantité est inférieure aux déclarations moyennes de quantité d'eau totale utilisée au cours de la campagne 1994 dans la région : environ 50 % des agriculteurs de Midi-Pyrénées apportent plus de  $1600 \text{ m}^3/\text{ha}$  durant la campagne d'irrigation. Ceci montre d'autant plus l'intérêt de notre modèle.

<sup>13</sup>L'ETM ou évapotranspiration maximale de la culture est la valeur maximale de l'évapotranspiration réelle de la culture lorsqu'aucun facteur n'est limitant.

<sup>14</sup>Le rendement potentiel est le rendement à l'ETM. Il s'agit d'un point de référence communément utilisé. Il représente l'optimum agronomique. A la différence, un rendement en sec est obtenu sans irrigation.

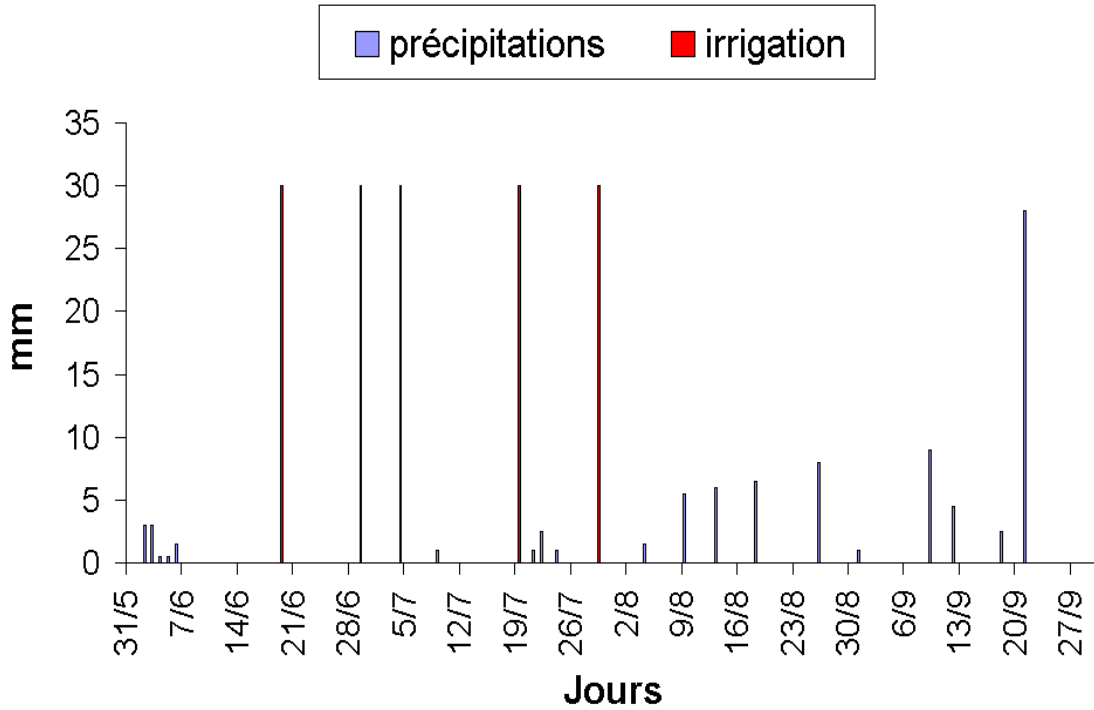


FIG. 5: Précipitations journalières exprimées en mm et conduite d’irrigation optimale pour la campagne d’irrigation de l’année 1989.

pour cette même année, un volume disponible de  $1500 \text{ m}^3/\text{ha}$  permet d’assurer un profit satisfaisant. En contexte de pénurie d’eau, l’agriculteur a intérêt à mieux raisonner ses apports.

Bien qu’il s’agisse d’une étude a posteriori, ces résultats présentent un intérêt pour la gestion prévisionnelle de l’eau. Ils ont permis de préciser la conduite d’irrigation optimale qu’il faut appliquer pour ce scénario climatique, dans un contexte de ressources en eau limitées à  $1500 \text{ m}^3/\text{ha}$ .

Nous présentons maintenant les résultats de simulation pour l’ensemble des scénarii climatiques.

#### 4.1.2 L’optimisation de la conduite d’irrigation pour l’ensemble des scénarii climatiques

Pour l’ensemble des scénarii climatiques, le modèle permet de préciser l’impact d’aléas climatiques sur le rendement et le profit. Ainsi, la figure 6 indique qu’il est toujours possible, quel que soit le climat, d’atteindre un rendement plus ou moins égal au rendement potentiel avec un volume d’eau disponible de  $1500 \text{ m}^3/\text{ha}$ . Les écarts<sup>15</sup> sont plus ou moins importants selon l’année climatique considérée. Les écarts sont d’autant plus faibles que le scénario climatique apparaît comme une année humide<sup>16</sup>.

<sup>15</sup>Ces résultats chiffrés sont représentés sous forme de tableaux donnés en annexe.

<sup>16</sup>Cette caractéristique climatique est définie par la comparaison entre le rendement à l’ETM et le rendement en sec : plus cette différence est faible, plus l’année sera considérée comme humide et moins l’irrigation sera efficace dans le sens où elle aura un impact moindre sur le rendement final.

Ces résultats sont aussi confirmés si l'on raisonne en terme de profit (figure 7). Même, pour des scénarii climatiques normaux ou humides, le modèle dégage des profits plus élevés que ceux requis pour obtenir un rendement potentiel, les coûts ayant un impact conséquent dans le calcul du profit.

Par une gestion optimale du volume disponible, des économies importantes de ressources en eau sont réalisées, surtout en année humide (figure 8).

La comparaison des scénarii climatiques montre également une variabilité quant à la définition de la conduite optimale (tableau 10 en annexe). Les conduites d'irrigation optimales sont les mêmes que l'on raisonne en terme de rendement ou en terme de profit . Il apparaît que les conduites d'irrigation permettant d'atteindre des rendements élevés s'avèrent presque semblables, pour les années normale et humide, dans le sens où les apports ont lieu dans le même laps de temps : milieu du mois de juillet et mois d'août. A la différence pour un scénario sec, il faut réaliser la campagne d'irrigation plus tôt : fin juin et juillet. Plus l'année est sèche, plus il faut débiter tôt la conduite d'irrigation afin d'atteindre un niveau de rendement maximal. Il existe jusqu'à un mois de décalage entre le début de la campagne d'irrigation en année sèche et le début de celle en année humide. Dans les cas humide et normale, la pluviosité assure l'essentiel des besoins hydriques de la plante.

Ces résultats montrent l'intérêt de notre modèle dans le sens où celui-ci permet à l'exploitant agricole de réaliser, par une conduite de l'irrigation optimale, un profit plus élevé tout en réalisant des économies de la ressource en eau très importants (figures 7 et 8).

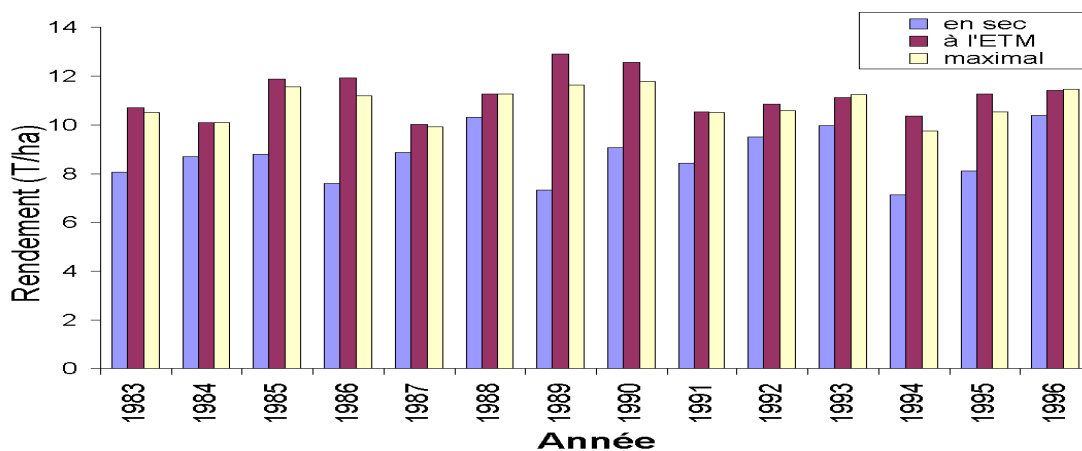


FIG. 6: Rendements simulés en sec, à l'ETM et pour une conduite d'irrigation optimale obtenue avec une quantité d'eau totale de  $1500 \text{ m}^3/\text{ha}$  pour l'ensemble des scénarii climatiques.

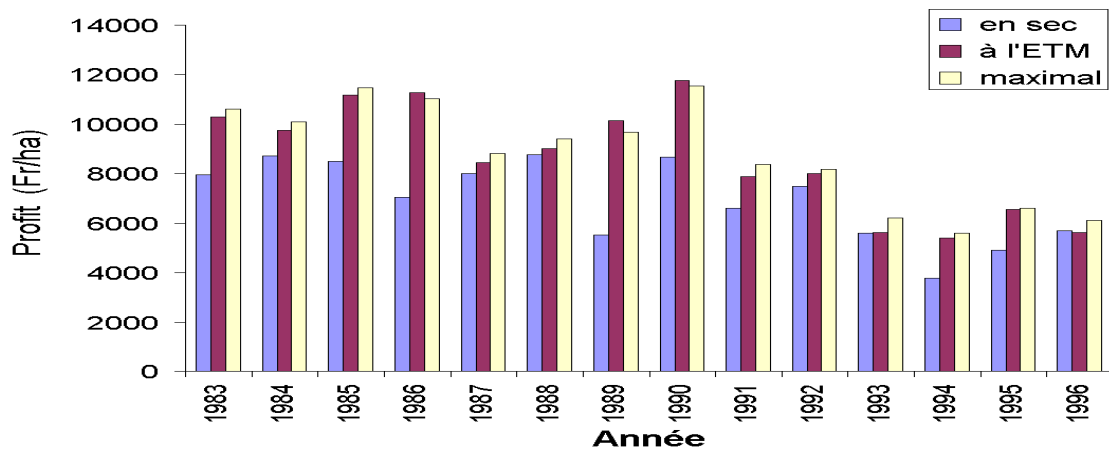


FIG. 7: Profits simulés avec un rendement en sec, à l'ETM ou maximal pour un volume d'eau disponible de  $1500 \text{ m}^3/\text{ha}$  pour l'ensemble des scénarii climatiques.

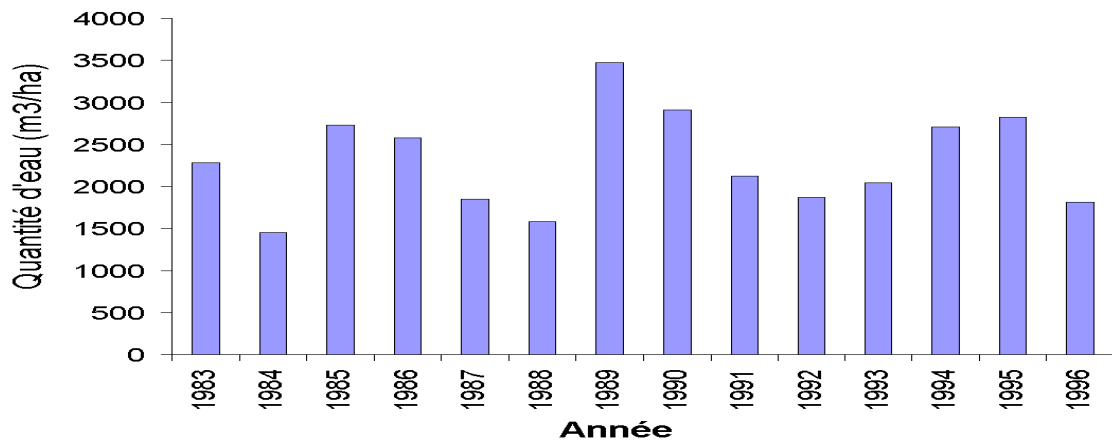


FIG. 8: Economies de ressources en eau entre profits maximaux et profits à l'ETM



### 4.1.3 Les résultats en tout point de la campagne d'irrigation

Le modèle dynamique permet également de dégager la conduite d'irrigation optimale en tout point de la campagne étant données les décisions déjà prises par l'exploitant. Le problème, dans ce cas, est alors de se placer à une certaine étape de décisions et de trouver la séquence de décisions optimale pour le restant.

Le modèle va alors, étant donné le chemin déjà suivi dans l'arbre de décisions, sélectionner l'ensemble des cas possibles, les analyser et sélectionner selon le même critère la meilleure conduite d'irrigation sur ce nouvel espace afin de maximiser le profit à la récolte.

Citons, comme exemple pour montrer le potentiel du modèle, le cas de figure suivant :

L'irrigant dispose d'une quantité totale de ressource de  $1500 \text{ m}^3/\text{ha}$  pour un scénario climatique type 1989 et se trouve au début de la quatrième étape de décisions. Sa séquence partielle de décisions déjà prises est la suivante :

1. Etape 1 : pas d'irrigation.
2. Etape 2 : pas d'irrigation.
3. Etape 3 : apport de 30 mm.

La conduite restante d'irrigation maximant le profit sera alors :

Etapes de décisions	4	5	6	7	8	9	10
Apport à chaque étape en mm	30	30	30	0	0	30	0

Le rendement maximal est, pour cette conduite optimale, de  $11,37 \text{ T}/\text{ha}$  et le profit de  $9403 \text{ F}/\text{ha}$ . Il est possible, à ce stade du processus de décision, d'obtenir un profit proche de celui optimisé pour l'ensemble de la campagne ( $9676 \text{ F}/\text{ha}$ ). En raisonnant au mieux ses apports, l'exploitant agricole peut ainsi minimiser l'écart de profit.

Le raisonnement précédent peut être appliqué tant dans un environnement certain que dans un cadre incertain. Toutefois, dans un environnement incertain, la conduite d'irrigation dépendra en plus des informations disponibles sur le passé ainsi que des anticipations faites sur les variables climatiques futures.

## 4.2 Les résultats dans un cadre incertain

### 4.2.1 La génération des solutions

L'approche que nous avons choisie pour obtenir la conduite optimale sous incertitude en prenant en compte d'une part le passé et d'autre les anticipations, est de résoudre un problème d'optimisation déterministe pour l'ensemble des périodes du processus de décision. Le modèle déterministe est formulé en remplaçant les variables stochastiques par leurs valeurs espérées conditionnelles au climat qui a eu lieu jusqu'à la date de la première étape du processus de décision. La décision de la première étape est alors calculée en intégrant un climat futur anticipé. Ensuite, le niveau d'irrigation optimal obtenu avec le scénario anticipé pour la première période est appliqué et le climat réel entre les deux périodes de décision est intégré au processus. Le programme est alors révisé. Ce processus de résolution est alors répété pour l'étape précédente et jusqu'à la fin du processus de décision.

La génération du climat futur à chaque étape du processus de décision est calculée en utilisant les moyennes journalières élaborées à partir du fichier de données climatiques ainsi que les répartitions

des variables climatiques nécessaires fonction des anticipations faites par l'exploitant agricole sur le scénario climatique futur. On distingue, pour cela, 3 cas de figure : l'agriculteur anticipe une année sèche, normale ou humide. Les scénarii climatiques générés par ces anticipations sont calculés à partir des fichiers existants<sup>17</sup>.

Ainsi, basée sur ces valeurs conditionnelles aux anticipations, les conduites d'irrigation qui maximisent l'espérance de profit sont calculées.

Elles sont ensuite comparées à celle obtenue en environnement certain. Dans ce cas, toutes les variables sont supposées connues ; il n'y a pas d'ajustement possible au cours du processus. On a ainsi obtenu la conduite d'irrigation optimale en l'absence de risque climatique, ce qui va constituer notre repère pour déterminer la performance du modèle dans le cas incertain. C'est une bonne indication de l'allocation optimale de la ressource sous connaissance parfaite.

Les résultats obtenus dans le cas incertain sont comparés à ceux dégagés avec une connaissance parfaite du climat afin de montrer les effets de l'incertitude.

Comme dans le cas certain, les résultats sont obtenus pour la campagne d'irrigation toute entière ou à tout stade du processus de décision.

#### 4.2.2 Les résultats pour l'ensemble de la campagne d'irrigation

Sous incertitude, la conduite d'irrigation maximise l'espérance de profit à la récolte. L'exploitant agricole choisit sa conduite d'irrigation en tenant compte d'une part, de son environnement risqué et d'autre part, de ses anticipations faites sur le climat.

Nous avons comme précédemment basé notre analyse sur l'année 1989 et avec une quantité d'eau totale disponible de  $1500 \text{ m}^3/\text{ha}$ . Rappelons qu'avec un tel scénario climatique, le rendement potentiel certain est de  $12,90 \text{ T/ha}$  tandis que le rendement maximal certain est de  $11,63 \text{ T/ha}$ . Nous appliquons alors le principe de génération des solutions avec deux cas extrêmes afin de montrer le potentiel de notre modèle. Le premier cas envisagé consiste à ne considérer que des anticipations sèches à chaque étape de décision ; par conséquent, l'agriculteur est alors proche de la réalité. Le second cas considère à l'opposé que l'agriculteur n'anticipe à chaque étape de décision que des anticipations humides. Les résultats obtenus sont donnés dans les tableaux (3) et (4) que nous comparons alors au cas de connaissance parfaite du climat.

	Anticipations	
	année sèche	année humide
Rendement potentiel certain	12,90	
Rendement maximal certain	11,63	
Rendement maximal espéré selon les anticipations	11,39 (1) / 11,38 (2)	10,86

TAB. 3: Rendements simulés potentiel certain et maximaux certain et espéré selon les anticipations.

---

<sup>17</sup>Les calculs seront basés pour l'année sèche sur le climat 1989, pour l'année normale sur 1991 et pour l'année humide sur 1993.

	Anticipations	
	année sèche	année humide
Profit potentiel certain	10141	
Profit maximal certain	9676	
Profit maximal selon les anticipations	9424 (1)/ 9414 (2)	8868

TAB. 4: Profits simulés potentiel certain et maximaux certain et espéré selon les anticipations.

Dans le cas incertain, avec anticipations sèches, il est possible d'atteindre des niveaux de rendements proches de celui maximal certain. Deux conduites (tableau(5)) d'irrigation, par la procédure de génération des solutions, sont envisageables. Elles diffèrent toutes les deux d'une part, de la conduite maximale certaine, et d'autre part, au niveau des décisions en deuxième et troisième étapes; elles permettent cependant d'atteindre des rendements quasiment identiques (11,39 et 11,38). Avec des anticipations humides (soit dans un cas générique d'erreurs d'anticipations), le rendement ainsi que le profit obtenus sont assez élevés. La conduite optimale est par contre différente et est plus décalée vers la fin de la campagne par rapport à la conduite optimale certaine. Du fait de ces anticipations, l'agriculteur repousse les applications d'eau car il prévoit un apport pluviométrique proche.

La conduite d'irrigation optimale ainsi que le rendement et le profit qu'il en découle sont fortement dépendants des anticipations.

Conduites optimales	Périodes de décision									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
certaine	30		30	30		30	30			
Anticipations sèches (1)	30		30	30	30	30				
(2)	30	30		30	30	30				
Anticipations humides		30			30	30		30	30	

TAB. 5: Conduites d'irrigation optimales pour une répartition uniforme du volume disponible de  $1500 \text{ m}^3/\text{ha}$ .

### 4.2.3 Les résultats en tout stade de la campagne

Les résultats concernant les possibilités du modèle de prise de décisions en tout point de la séquence de décisions dans un cadre certain peuvent être étendus en univers incertain.

Reprenons le même exemple que dans le cas certain.

La conduite optimale restante à suivre est alors fonction des anticipations<sup>18</sup> :

<sup>18</sup>On suppose que les anticipations sont identiques pour toutes les étapes. Cette hypothèse restrictive peut être facilement supprimée mais cela n'améliore pas la compréhension du problème.

Etapes de décisions	4	5	6	7	8	9	10
Apport à chaque étape en mm avec anticipations d'une année sèche	0	0	30	30	30	30	0
Apport à chaque étape en mm avec anticipations d'une année normale	30	30	30	0	0	30	0
Apport à chaque étape en mm avec anticipations d'une année humide	0	30	30	30	30	0	0

Les profits comme les rendements engendrés pour ces conduites optimales sont liés aux anticipations faites et peuvent atteindre des niveaux très élevés (Tab. 6).

	Anticipations		
	année sèche	année normale	année humide
Espérance de rendement	10,7	11,37	10,99
Ecart avec le rendement certain (11,37)	0,67	0	0,38
Espérance de profit	8700	9403	9005
Ecart avec le profit certain (9403)	703	0	398

TAB. 6: Rendements et profits espérés maximaux pour une quantité totale de  $1500 \text{ m}^3/\text{ha}$ .

Les profits sont diminués, sauf pour les anticipations normales, entre les cas stochastique et certain. Ces écarts constituent le coût de ne pas posséder l'information complète.

## 5 Conclusion

Le modèle économique développé dans cet article inclut un modèle agronomique performant EPIC. Nous utilisons ce modèle agro-économique pour analyser la conduite d'irrigation intra-saisonnière dans un contexte d'incertitude sous des conditions de ressources en eau limitées. Nous avons proposé d'une part, une nouvelle approche pour modéliser ce problème en se fondant sur des techniques d'optimisation mathématique et d'autre part, un nouveau concept pour obtenir des solutions numériques.

Le modèle permet de déterminer la conduite d'irrigation maximisant le profit ou l'espérance de profit selon le cadre d'analyse retenu. Il devient un véritable outil d'aide à la décision pour l'exploitant agricole en matière de conduite d'irrigation tout au long de la campagne.

Les résultats montrent qu'il est possible, dans un contexte de rareté et d'incertitude, d'obtenir des niveaux de profits aussi voire plus élevés que dans un cadre non limité, par une gestion rigoureuse et efficace de l'irrigation. On obtient également des économies de ressources en eau très importantes.

Trois extensions peuvent être proposées à ce modèle. Tout d'abord, concernant son utilisation, par son approche micro-économique de la gestion de l'eau, ce modèle permet de calculer des fonctions de demande en eau à usage agricole au niveau d'une exploitation agricole. Cette approche peut être étendue à une analyse plus macro-économique de la gestion de l'eau à l'échelle de la région en stratifiant la population concernée.

Ensuite, relativement aux hypothèses restrictives imposées dans la phase simulation, la conduite est supposée constituée d'apports homogènes. On peut étendre le modèle en ne fixant ni la dose par apport ni le nombre de tours d'eau au cours de la campagne. Toutefois, en l'état actuel du

programme, on serait confronté au phénomène connu en programmation dynamique de "curve of dimensionality"<sup>19</sup> nécessitant des outils informatiques très performants. Cet aspect peut être limité par l'utilisation de techniques de calcul plus poussées comme les algorithmes génétiques qui permettent de résoudre des problèmes d'optimisation mathématiques complexes.

Enfin, de par le raisonnement en incertitude, il est prouvé que le critère d'espérance de profit est restrictif dans le sens où l'exploitant agricole ne raisonne pas, face à un risque climatique, uniquement en terme d'espérance de profit mais plutôt en terme d'espérance d'utilité de profit. L'aversion au risque affecte sa prise de décisions. Il convient alors d'intégrer cet aspect dans le processus de décisions.

---

<sup>19</sup>Lors du choix du nombre d'états possibles du système, ce phénomène peut apparaître. Lorsque le nombre de variables d'état et de contrôle augmente, le temps et la mémoire augmentent de façon exponentielle (Yakowitz, 1982).

## Références

- [1] ASTROM, K.J. : Introduction to stochastic control theory. Mathematics in science and engineering. Volume 40. 1970.
- [2] BELLMAN, R. : Introduction to the mathematical theory of control processes. Volume I : Linear equations and quadratic criteria. Mathematics in science and engineering. Volume 40-II. 1971.
- [3] BELLMAN, R. : Introduction to the mathematical theory of control processes. Volume II : Non linear processes. Mathematics in science and engineering. Volume 40-II. 1971.
- [4] BELLMAN, R. DREYFUS, M.S. : La programmation dynamique et ses applications.
- [5] BENSOUSSAN, A. GERALD HURST JR, E. NÄSLUND, B. : Management applications of modern control theory.
- [6] BERTSEKAS, D.P. : Dynamic programming and stochastic control.
- [7] BIERE, A.W. LEE, I.M. : A model for managing reservoir water releases. American Journal of Agricultural Economics. 1972. 54(3). 411-21.
- [8] BURT, O.R. : The economics of conjunctive use of ground and surface water. Hilgardia, 1968. 36(2). 31-111.
- [9] BURT, O.R. JOHNSON, R. : Strategies for wheat production in the great plains. J. Farm. Econ. 1967. 49. 881-99.
- [10] BURT, O.R. STAUBER, M.S. : Economic analysis of irrigation in subhumid climate. American Journal of Agricultural Economics. 1971. 53(1). 33-46.
- [11] BUTCHER, W.S. : Stochastic dynamic programming for optimum reservoir operation. Water Resources Bulletin. 1971. 7(1). 115-123.
- [12] CABELGUENNE, M. et DEBAEKE, P. : Manuel d'utilisation du modèle EWQTPR (Epic-Phase temps réel) version 2.13. Ed. Station d'Agronomie Toulouse INRA. 1995.
- [13] CABELGUENNE, M. JONE, C.A. and WILLIAMS, J.R. : Use of the EPIC model for research on optimum strategies for limited irrigation. Application to maize in southwestern France. 1993. C.r. Acad. Agric. 79. 73-84.
- [14] CABELGUENNE, M. et DEBAEKE, P. : Simulation of short term tactical irrigation under limited water resources. 1994. 3<sup>rd</sup> ESA Congress, Abano-Padova.
- [15] CABELGUENNE, M. DEBAEKE, P. et PUECH, J. : Simulation de stratégies et de tactiques d'irrigation en conditions de ressources en eau limitées. 1994. Commission internationale des irrigations et du drainage, Varna.
- [16] CABELGUENNE, M. DEBAEKE, P. PUECH, J. BOSCH, N. and HILAIRE, A. : Tactical irrigation management using real time EPIC-Phase model and weather forecast. Experiment on corn. 1995. Commission internationale des irrigations et du drainage, Rome.
- [17] CLARK, J.W. : Mathematical Bioeconomics. 1976. (New York : Wiley).
- [18] COLLOMB, G. : Estimation non paramétrique de la régression par la méthode du noyau. Thèse doctorale. Université Paul Sabatier. Toulouse. 1976.
- [19] DEUMIER, J.M. LEROY, P. et PEYREMORTE, P. : Des outils pour une meilleure maîtrise. Perspectives Agricoles. 1996. Avril. 212. 60-64.

- [20] DOORENBOS, J. and KASSAM, A.H. : Yield response to water. Irrigation and drainage paper 33. FAO. Rome. 1979.
- [21] Données chiffrées. Agriculture n°85. Août 1996. Les pratiques culturales sur grandes cultures en 1994. Agreste. Ministère de l'Agriculture, de la Pêche et de l'Alimentation.
- [22] DUDLEY, N.J. HOWELL, D.T. MUSGRAVE, W.F. : Irrigation planning 3 : the best size of irrigation water allocation. Water Resources Research. 1972. 8(1). 7-17.
- [23] DUDLEY, N.J. HOWELL, D.T. MUSGRAVE, W.F. : Optimal intraseasonal irrigation water allocation. Water Resources Research. 1971. 7(4). 770-88.
- [24] FLINN, J.C. MUSGRAVE, W.F. : Development and analysis of input-output relations for irrigation water. The Australian Journal of Agricultural Economics. 1967. 11(1). 1-19.
- [25] GOULTER, I.C. TAI, F.-K. : Practical implications in the use of stochastic dynamic programming for reservoir operation. Water Resources Bulletin. 1985. 21(1).65-74.
- [26] KAMIEN, M.I. SCHWARTZ, N.C. : Dynamic optimization. The calculus of variations and optimal control in economics and management.
- [27] KATAOKA, S. : A stochastic programming model. Econometrica. 1963. 31(1-2). 181-196.
- [28] JONES and KINIRY. CERES-MAIZE, a simulation model of maize growth and development. Texas A&M University Press. 1986. 194 p.
- [29] LEROY, P. and JACQUIN, C. : LORA : A decision support system for the choice of crops on the irrigable area of a farm. IFORS-SPC 1, Bruges. 1991.
- [30] MALLIARIS, A.G. BROCK, W.A. : Stochastic methods in economics and finance.
- [31] MATANGA, G.B. MIGUEL, A.M. : Irrigation planning 2 : water allocation for leaching and irrigation purposes. Water Resources Research. 1979. 15(3). 679-83.
- [32] Mc GUCKIN, J.T. MAPEL, C. LANSFORD, R. SAMMIS, T. : Optimal control of irrigation scheduling using a random time frame. American Journal of Agricultural Economics. 1987. February. 123-33.
- [33] MINOUX, M. : Programmation mathématique. Théorie et algorithmes. tome2.
- [34] RAO, N.H. SARMA, P.B.S. CHANDER, S. : Optimal multicrop allocation of seasonal and intraseasonal irrigation water. Water Resources Research. 1990. 26(4). 551-559.
- [35] ROSS, S.M. : Introduction to stochastic dynamic programming. Probability and mathematical statistics. Academic Press, INC. 1983.
- [36] SAMUELSON, P.A. : Lifetime portfolio selection by dynamic stochastic program. Review of Economics and Statistics. 1969. 69. 84-96.
- [37] SEIERSTAD, A. SYDSAETER, K : Optimal control theory with economic applications. Advanced textbooks in economics. Volume 24. 1987.
- [38] SETHI, S.P. THOMPSON, G.L. : Optimal control theory : applications to management science. International series in management science/operations research. Martinus Nijhoff Publishing. 1981.
- [39] SHARPLEY, A.N. WILLIAMS, J.R. : EPIC-Erosion/Productivity Impact Calculator 1. Model Documentation. United States Department of Agriculture. Agricultural Research Service Technical Bulletin. 1990. 1768. 1-234.

- [40] STEDINGER, J.R. SULE, B.F. LOUCKS, D.P. : Stochastic dynamic programming models for reservoir operation optimization. *Water Resources research*.1984. 20(11). 1499-1505.
- [41] STOCKLE, C.O. MARTIN, S.A. CAMPBELL, G.S. : CROPSYST, a cropping systems simulation model : water/nitrogen budgets and crop yield. *Agric. Syst.* 1994. 46. 335-359.
- [42] TORABI, M. MOBASHERI, F. : A stochastic dynamic programming model for the optimum operation of a multi-purpose reservoir. *Water Resources Bulletin.* 1973. 9(6). 1089-1099.
- [43] TSAKIRIS, G. KIOUNTOUZIS, E. : Optimal intraseasonal irrigation water distribution. *Advances in Water Resources.* 1984. 7. 89-92.
- [44] VEDULA, S. MUJUMDAR, P.P. : Optimal reservoir operation for irrigation of multiple crops. *Water Resources Research.* 1992. 28(1). 1-9.
- [45] WILLIAMS, J.R., DYKE, P.T., FUCHS, W.W. BENSON, V. RICE, O.W. and TAYLOR, E.D. : EPIC-Erosion Productivity Impact Calculator : 2. User Manual. United States Department of Agriculture Agricultural Research Service Technical Bulletin, 1990. 1768. 235-262.
- [46] YAKOWITZ, S. : Dynamic Programming applications in water resources. *Water Resources research.* 1982. 18(4). 673-696.
- [47] YARON, D. DINAR, A. : Optimal allocation of farm irrigation water during peak seasons. *American Journal of Agricultural Economics.* 1982. November. 681-689.
- [48] YARON, D. OLIAN, A. : Application of dynamic programming in Markov chains to the evaluation of water quality in irrigation. *American Journal of Agricultural Economics.* 1973. 55(3). 467-71.



**Annexe : résultats des simulations pour les différents scénarii climatiques.**

Année	Rendement de la culture		
	Rendement en sec	Rendement à l'ETM (Quantité d'eau nécessaire en $m^3$ )	Rendement maximal pour une répartition uniforme de $1500 m^3$ (stratégie)
1983	8,07	10,70 (3780)	10,5 (232)
1984	8,69	10,10 (2950)	10,08 (250)
1985	8,79	11,87 (4230)	11,56 (228)
1986	7,59	11,91 (4080)	11,18 (234)
1987	8,88	10,01 (3350)	9,93 (231)
1988	10,30	11,26 (3080)	11,26 (247)
1989	7,32	12,90 (4970)	11,63 (62)
1990	9,06	12,56 (4410)	11,77 (236)
1991	8,43	10,53 (3620)	10,51 (247)
1992	9,51	10,85 (3370)	10,57 (252)
1993	9,97	11,12 (3540)	11,24 (247,227,192,250)
1994	7,14	10,35 (4210)	9,76 (235)
1995	8,12	11,27 (4320)	10,52 (233)
1996	10,39	11,40 (3310)	11,47 (48,49)

TAB. 7: Rendements simulés en sec, à l'ETM et pour une répartition uniforme de la quantité d'eau totale de  $1500 m^3$  pour l'ensemble des scénarii climatiques.

Année	Ecart de Rendement ETM et en sec en T/ha	Ecart de Rendement ETM et Max 1500 en T/ha (écart de quantité en $m^3$ )
1983	2,63	0,2 (2280)
1984	1,41	0,02 (1450)
1985	3,08	0,31 (2730)
1986	4,32	0,73 (2580)
1987	1,13	0,08 (1850)
1988	0,96	0 (1580)
1989	5,58	1,27 (3470)
1990	3,50	0,79 (2910)
1991	2,10	0,02 (2120)
1992	1,34	0,28 (1870)
1993	1,15	0,12 (2040)
1994	3,21	0,59 (2710)
1995	3,15	0,75 (2820)
1996	1,01	0,07 (1810)

TAB. 8: Ecarts de rendements et de quantités d'eau totales nécessaires.

Année	Profit de la culture exprimé en Fr/ha		
	Profit en sec	Profit pour un rendement à l'ETM	Profit maximal pour une répartition uniforme de 1500 $m^3$ (stratégie)
1983	7954	10301	10621 (232)
1984	8725	9753	10090 (250)
1985	8492	11163	11471 (228)
1986	7053	11283	11031 (234)
1987	8001	8455	8826 (231)
1988	8758	9004	9399 (247)
1989	5529	10141	9676 (62)
1990	8674	11753	11537 (236)
1991	6600	7875	8384 (247)
1992	7481	7995	8179 (252)
1993	5610	5620	6223 (247,227,192,250)
1994	3789	5406	5593 (235)
1995	4908	6566	6619 (233)
1996	5688	5623	6128 (48,49)

TAB. 9: Profits simulés pour des rendements en sec, à l'ETM et pour une répartition uniforme de la quantité d'eau totale de 1500  $m^3$  pour l'ensemble des scénarii climatiques.

	Périodes de décision									
Année	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1983				30	30	30	30	30		
1984					30	30		30	30	30
1985			30			30	30	30		30
1986				30	30	30	30			30
1987			30				30	30	30	30
1988					30	30	30	30	30	
1989	30		30	30		30	30			
1990				30	30	30		30		30
1991					30	30	30	30	30	
1992						30	30	30	30	30
1993					30	30	30	30	30	
1994				30	30	30		30	30	
1995				30	30	30	30		30	
1996	30	30				30	30		30	

TAB. 10: Stratégies d'irrigation optimales pour une répartition uniforme du volume disponible de  $1500 \text{ m}^3/\text{ha}$  pour l'ensemble des scénarii climatiques.