

# CIHEAM



Centre  
International  
de Hautes Etudes  
Agronomiques Méditerranéennes

*International  
Centre for  
Advanced  
Mediterranean Agronomic Studies*

## Thèse / *Thesis*

requis pour  
l'obtention du Titre

*submitted  
for the Degree of*

## Master of Science

**Modélisation micro-économique  
spécialisée des exploitations  
irrigantes dans la Beauce**

**F. Ouchiha**

**Série « Master of Science » n° 127  
2013**

**Institut Agronomique Méditerranéen de  
Montpellier**



**CIHEAM**  
**IAM MONTPELLIER**

**Modélisation micro-économique  
spécialisée des exploitations  
irrigantes dans la Beauce**

**F. Ouchiha**

**Série « Master of Science » n° 127  
2013**



**Modélisation micro-économique spatialisée des exploitations irrigantes  
dans la Beauce**

**F. Ouchiha**

**Série « Master of Science » n° 127**

**2013**

## Série Thèses et Masters

Ce Master est le numéro 127 de la série *Master of Science* de l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier.

Cette collection réunit les Masters of Science du CIHEAM-IAMM ayant obtenu la mention « Publications », ainsi que les travaux doctoraux réalisés dans le cadre des activités scientifiques et pédagogiques de l'Institut et de ses enseignants chercheurs.

Le *Master of Science* du Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes :  
**Modélisation micro-économique spécialisée des exploitations irrigantes dans la Beauce**

a été soutenu par **F. Ouchiha** le 14 juin 2012 devant le jury suivant :

M. Guillermo Flichman, Professeur associé, CIHEAM-IAMM .....	Président
M. Pierre Ruelle, Chercheur, IRSTEA .....	Membre
Mme Sylvie Morardet, Chercheur, IRSTEA .....	Membre
M. Sébastien Loubier, Chercheur, IRSTEA .....	Membre
M. Hatem Belhouchette, Enseignant-chercheur, CIHEAM-IAMM.....	Membre

Le travail de recherche a été encadré par **Hatem Belhouchette**

**CIHEAM-IAMM**  
**Institut agronomique Méditerranéen**  
**de Montpellier**

**Directeur : Vincent Dollé**

3191 route de Mende – BP 5056  
34093 Montpellier cedex 05  
Tél. : 04 67 04 60 00  
Fax : 04 67 54 25 27  
<http://www.iamm.fr>

**L'institut Agronomique Méditerranéen**  
**n'entend donner aucune approbation ni improbation**  
**aux opinions émises dans cette thèse**

ISBN : 2-85352-510-4 ; ISSN : 0989-473X

Numéros à commander au  
CIHEAM- IAMM  
Bureau des Publications  
e-mail : [tigoulet@iamm.fr](mailto:tigoulet@iamm.fr)  
Prix : 50€  
© CIHEAM, 2013

## Fiche bibliographique

F. Ouchiha - **Modélisation micro-économique spatialisée des exploitations irrigantes dans la Beauce**  
- Montpellier : CIHEAM-IAMM. 118p. (Master of Science - 2013 ; n°127).

**Résumé :** La nappe de Beauce a fait l'objet de plusieurs mesures visant à réduire la consommation en eau et à maintenir le niveau piézométrique stable. La mise en place de telles politiques pose la question de leurs impacts sur les exploitations en termes de revenus et de consommation en eau, et la différenciation de ces impacts en tenant compte de la grande hétérogénéité spatiale du milieu. Cette étude a comme objectif d'évaluer l'impact des différentes mesures envisagées sur des exploitations irrigantes 'spatialisées', pour cela, un modèle bio-économique de type stochastique prenant en compte la variabilité climatique a été conçu, il reproduit le comportement d'une exploitation de type GC-Betterave se situant dans une zone qui se distingue des autres par un climat relativement plus sec au printemps et en été et plus variable. Ce modèle prend en compte aussi la variabilité des rendements des cultures en fonction du climat, du type de sol et de la dose d'irrigation apportée. Deux scénarios ont été simulés : un scénario visant à augmenter le prix de l'eau et un autre à réduire le volume d'eau de références dont dispose l'exploitation. Les résultats obtenus montrent deux méthodes d'adaptation possibles : une adaptation par ajustement des assolements, et une adaptation par réduction des doses, les deux conduisent à une réduction de la consommation, significative dans le scénario eau, mais aussi à une chute de revenu inévitable, très importante dans le scénario prix. Les résultats du scénario 'prix' montrent également que le prix de l'eau ne devient incitatif que lorsqu'il est multiplié par 7 (ou plus) et ceux du scénario 'eau' posent la question de la possibilité de mise en place de volumes de référence très contraignants.

**Mots-clés :** Beauce, consommation en eau, climat, sols, spatialisation, évaluation d'impacts, exploitations irrigantes, bio-économique, stochastique, hétérogénéité, scénario, prix de l'eau, volumes de référence.

**Abstract:** *Spatial micro-economic modeling of irrigating farms in Beauce*

**Sum0.mary:** *The sheet of Beauce was the subject of several policies aiming to reduce water consumption and to maintain the piezometric level constant. The implementation of these policies raises questions regarding their impacts on farms in terms of income and water consumption, and differentiation of these impacts, taking into account the spatial heterogeneity of the territory. The objective of this study is to assess the impact of considered measures on 'spatialized' irrigating farms. A stochastic bio-economic model was designed to reproduce the behavior of an "arable crops-Beet" -farm type- located in an area where climate is relatively drier in spring and summer and more variable. This model also takes into account the variability of crop yields according to climate, soil types and irrigation doses supplied. Two scenarios were simulated: the first aims to increase the price of water and the second to reduce the reference volume. The results show two possible methods of adaptation: an adaptation by adjusting cropping pattern and an adaptation by reducing doses. Both lead to decrease of water consumption, more significantly in the 'water' scenario, but also to an inevitable decrease in income, very important in the 'price' scenario. The 'price' scenario show that the price of water becomes incentive only when it is seven times higher (more or less) and 'water' scenario results question the possibility of setting up very restrictive reference volume.*

**Keywords:** *Beauce, water consumption, climate, soils, spatialization, impacts assessment, irrigating farms, bio-economic, stochastic, heterogeneity, scenario, water prices, reference volumes.*

# Remerciements

Il est rare qu'un travail soit le fruit d'une seule personne ; celui-ci ne fait pas partie des exceptions, aussi qu'il me soit permis d'exprimer ma profonde reconnaissance et mes sincères remerciements à :

Mme Sylvie Morardet et monsieur Sébastien Loubier qui ont accepté de m'encadrer, pour leur aide précieuse, les conseils et l'attention qu'ils m'ont prodiguée tout au long de mon travail.

Monsieur Hatem Belhouchette qui a accepté de diriger ce travail, pour ses précieux conseils, sa compréhension, son soutien personnel et professionnel et surtout sa patience avec moi tout au long de ce travail.

Monsieur Guillermo Flichman qui a accepté de présider mon jury.

Monsieur Pierre Ruelle qui a accepté de faire partie de mon jury et d'examiner mon travail.

Un grand merci à toute l'équipe de recherche de l'UMR G-EAU et à tout le personnel du Cemagref qui m'ont accueillie à bras ouverts, et à tous les chercheurs que j'ai sollicités à plusieurs reprises : Katrin Erdlenbruch, Jean-Claude Mailhol et Pierre Ruelle.

Mes vifs remerciements vont également à Laurent Brunel et Jacques Fabre pour leur présence et leur aide pendant une grande partie de cette étude.

Une personne que je n'oublie pas et grâce à qui je me suis initiée au langage GAMS :

Mlle Imène Souissi, je la remercie pour son aide, ses orientations, sa présence et ses qualités humaines.

Tous les responsables de la Chambre d'agriculture du Loiret et du service ROSACE qui ont accepté de nous fournir les données nécessaires pour réaliser ce travail.

Je suis également très reconnaissante à tout le personnel de l'IAMM, pour l'accueil et l'aide reçue notamment par le service de documentation.

Je n'oublie pas ceux à qui je dois d'être ici : mes parents et mon frère, qui ont eu la force et le courage de me supporter pendant mes longues études, et ma famille de manière générale.

Il y a aussi toutes les personnes que j'ai rencontrées à Montpellier et mes amis d'Algérie, qui ont apporté leurs encouragements et leur soutien moral durant toute la réalisation de ce travail et pendant les moments les plus difficiles.

Il est difficile de n'oublier personne et je pourrais me contenter de remercier toute personne qui m'a aidée de près ou de loin à la réalisation de ce travail.

**Merci**

# Dédicaces

*A mes très chers parents,*

Qui ont consenti tant de sacrifices pour que je puisse achever mon parcours en beauté.

A mon père qui m'a toujours dit : « Les études sont la seule chose que tu peux posséder et que nulle personne ne pourra t'enlever ».

A ma chère maman qui m'a toujours soutenue, qui a toujours été là pour moi même à distance.

Que ce mémoire, fruit de longues années de travail, d'effort et de patience, vous soit un faible témoignage de mon profond amour, de ma très grande affection et de ma gratitude.

A mon très cher frère qui a toujours été présent quand j'ai eu besoin de lui.

Trouve dans ce travail l'expression d'une fraternité sincère et d'un amour profond.

A toute ma famille et à tous mes amis d'Algérie et de Montpellier

*A tous ceux dont l'oubli du nom n'est pas celui du cœur.*

***Farida***



# Table des matières

Liste des figures et des tableaux.....	3
Liste des sigles et des abréviations .....	5
Introduction .....	7
<b>Partie I. Analyse bibliographique.....</b>	<b>9</b>
<b>Chapitre I. Quelle approche pour l'évaluation de l'impact des politiques publiques ?.....</b>	<b>9</b>
I. Approche bio-économique .....	9
1. Définition et objectif .....	9
2. Avantages .....	10
3. Limites des modèles .....	10
4. La programmation mathématique dans les modèles bio-économiques .....	10
II. Application à l'échelle de l'exploitation agricole.....	11
1. Spatialisation des exploitations agricoles.....	11
2. Intégration de l'information spatiale dans les modèles .....	12
<b>Chapitre II. La gestion de l'eau : une priorité pour les politiques publiques .....</b>	<b>13</b>
I. Instruments de gestion de l'eau.....	13
1. Les mesures réglementaires.....	13
2. La taxation de l'eau .....	13
3. La tarification d'un service.....	14
4. Les incitations .....	14
5. Les marchés de l'eau .....	14
6. Les subventions .....	14
II. Cas de la Beauce .....	15
1. Contexte .....	15
2. Bilan des mesures prises autour de la gestion de l'eau en Beauce .....	15
<b>Chapitre III. Problématique et objectif de l'étude .....</b>	<b>17</b>
Partie II. Matériel et méthodes.....	19
<b>Chapitre I : Présentation de la zone d'étude.....</b>	<b>19</b>
I. Situation géographique .....	19
II. Climat .....	20
III. Sols.....	20
IV. Ressources hydriques : la nappe de Beauce .....	22
V. L'agriculture beauceronne.....	23
<b>Chapitre II : Démarche générale et choix des outils .....</b>	<b>24</b>
<b>Chapitre III. Présentation des exploitations et source des données utilisées .....</b>	<b>26</b>
I Typologie .....	26
II Caractéristiques de l'exploitation-type retenue .....	27
<b>Chapitre IV. Modélisation Bio-économique.....</b>	<b>29</b>
I. Choix du modèle .....	29
II. L'acquisition de données préalable à la construction du modèle .....	29
III. Hypothèses de modélisation.....	30
IV Présentation du modèle bio-physique « Pilote» .....	30
1 Données d'entrée du modèle .....	31
2 Simulation .....	33
V. Présentation du modèle économique écrit sous « GAMS » .....	36
1. Formulation mathématique du modèle.....	36
2. Evaluation du modèle (calibration et validation) .....	44

<b>Chapitre V. Scénarios simulés</b> .....	46
I .Scénario 1 .....	46
II. Scénario 2 .....	47
III. Introduction des scénarios dans le modèle .....	47
<b>Partie III. Résultats et discussion</b> .....	49
<b>Chapitre I. Résultats des simulations par ‘Pilote’</b> .....	49
<b>Chapitre II. Résultats du modèle économique</b> .....	50
I. Analyse du scénario de référence .....	51
1. Assolement .....	51
2. Consommation en eau .....	53
3. Revenu .....	54
II. Scénario prix (S1) .....	55
1. Assolement .....	55
2. Ajustement des doses d’irrigation à l’augmentation du prix de l’eau .....	57
3. Consommation en eau .....	58
4. Revenu .....	62
5. Volumes des productions .....	63
III. Scénario eau : restriction du volume de référence .....	63
1. Assolement .....	63
2. Ajustement des doses d’eau .....	67
3. Consommation en eau .....	68
4. Revenu .....	72
5. Volumes des productions .....	73
<b>Chapitre III. Synthèse des résultats et discussion</b> .....	74
I. Synthèse et comparaison des deux politiques .....	74
II. Discussion .....	75
<b>Conclusion</b> .....	77
<b>Liste des références</b> .....	78
<b>Liste des annexes</b> .....	83

# Liste des figures et des tableaux

## Figures

Figure 1. Représentation conceptuelle de l'étude.....	18
Figure 2. Carte de localisation de la zone d'étude (la Beauce) .....	19
Figure 3. Pluviométrie annuelle sur 30 ans sur le territoire de la Beauce .....	20
Figure 4. Distribution des classes de profondeur du sol.....	21
Figure 5. Distribution des textures des horizons de surface d'Ile de France et du Loiret .....	21
Figure 6. Distribution de la Réserve Utile.....	22
Figure 7. Représentation schématique des principales étapes et éléments intervenant dans la modélisation bio-économique .....	25
Figure 8. Assolement comparé des exploitations-type.....	27
Figure 9. Interface de pilote .....	31
Figure 10. Cartographie des classes de mailles .....	33
Figure 11. Assolement global dans le scénario de référence en ha ou en % de la SAU .....	52
Figure 12. Volume d'eau disponible et consommé en moyenne dans le scénario de référence en milliers de m <sup>3</sup> .....	53
Figure 13. Consommation en eau selon l'année climatique dans le scénario de référence en milliers de m <sup>3</sup> .....	54
Figure 14. Contribution de chaque culture au revenu total moyen dans le scénario de référence .....	54
Figure 15. Evolution de l'assolement global selon les différents niveaux du prix de l'eau .....	55
Figure 16. Evolution des surfaces conduites en sec et irriguées en fonction des différents prix de l'eau .....	56
Figure 17. Evolution de la superficie irriguée dans 3 états climatiques .....	57
Figure 18. Evolution de l'allocation de l'eau entre les cultures par ha selon le niveau du prix de l'eau... ..	58
Figure 19. Evolution de la consommation en eau totale moyenne en fonction des différents prix de l'eau .....	59
Figure 20. Evolution de la consommation en eau par type d'année climatique en fonction des différents prix de l'eau .....	60
Figure 21. Evolution de l'allocation du volume de référence de 71 500 m <sup>3</sup> entre les cultures en fonction des différents prix de l'eau, pour différents états climatiques.....	61
Figure 22. Evolution du revenu total moyen selon les différents niveaux du prix de l'eau.....	62
Figure 23. Revenu total par type d'année climatique et selon les différents niveaux du prix de l'eau .....	62
Figure 24. Evolution du volume de production selon le prix de l'eau .....	63
Figure 25. Evolution de la surface destinée aux CIP et aux CIE selon les différents niveaux de volume de référence .....	64
Figure 26. Evolution de l'assolement global selon les différents niveaux de volume de référence.....	64
Figure 27. Evolution de l'assolement sur les 3 types de sol selon les différents niveaux de volume de référence .....	65
Figure 28. Evolution des surfaces conduites en sec et irriguées en fonction des différents niveaux de volume de référence .....	66
Figure 29. Evolution de la superficie irriguée selon le type de printemps .....	67
Figure 30. Evolution de l'allocation de l'eau entre les différentes cultures pour un ha selon le niveau du volume de référence.....	68
Figure 31. Evolution de la consommation en eau totale moyenne en fonction des différents niveaux de volume de référence.....	69
Figure 32. Evolution de la consommation par type d'année climatique en fonction des différents niveaux de volume de référence.....	69
Figure 33. Evolution de l'allocation de l'eau entre les cultures en fonction des différents niveaux de volume de référence, pour différents états climatiques .....	71
Figure 34. Revenu total moyen pour différents niveaux de volume de référence.....	72
Figure 35. Revenu total par type d'année climatique et selon les différents niveaux de volume de référence.....	73

Figure 36. Evolution de la production selon les différents niveaux de volume de référence .....73

## Tableaux

Tableau 1. Stratégies appliquées par culture et par type de sols selon les différents états climatiques avec les doses associées.....	34
Tableau 2. Présentation des éléments définissant des activités et les indices utilisés dans GAMS .....	38
Tableau 3. Probabilités d'apparition des différents états climatiques .....	39
Tableau 4. Comparaison de l'assolement réel moyen (données RPG 2008) et de l'assolement calculé par le modèle, pour une exploitation moyenne de type GC-Betterave (ha) .....	45
Tableau 5. Différents niveaux de prix de l'eau appliqués .....	50
Tableau 6. Les coefficients de nappe appliqués et les volumes de références réduits qui en résultent en m <sup>3</sup> .....	50
Tableau 7. Répartition des cultures retenues sur les trois types de sol dans le scénario de référence:.....	53
Tableau 8. Cultures subissant des diminutions de doses lorsque le prix de l'eau augmente .....	58
Tableau 9. Cultures subissant des diminutions de doses lorsque le volume de référence diminue .....	68
Tableau 10. Comparaison des deux scénarios du point de vue baisse de la consommation et perte de revenu accompagnée .....	75

# Liste des sigles et des abréviations

**ACP** : Analyse en composantes principales  
**AEP** : Alimentation en eau potable  
**CA** : Chambre d'agriculture  
**CLE** : Commission locale de l'eau  
**Coef.** : Coefficient  
**Cons.** : Consommation  
**DCE** : Directive cadre sur l'eau  
**DDAF** : Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt  
**DDT** : Direction départementale des territoires  
**DPU** : Droits à payement unique  
**DRAAF** : Direction Régionale de l'Alimentation de l'Agriculture et de la Forêt du Centre  
**FNE** : France nature et environnement  
**GAMS** : *General Algebraic Modeling System*  
**IFEN** : Institut français de l'environnement  
**INSEE** : Institut national de la statistique et des études économiques  
**IRSTEA** : Institut de recherche pour l'ingénierie de l'agriculture et de l'environnement  
**ITB** : Institut technique de la betterave  
**MAE** : Mesures agro-environnementales  
**ONEMA** : Office National des Eaux et des Milieux Aquatiques  
**PAC** : Politiques agricoles communes  
**PMP** : Programmation mathématique positive  
**Rdt.** : Rendement  
**RGA** : Recensement général de l'agriculture  
**ROSACE** : Réseau d'observation des systèmes agricoles en région Centre  
**RPG** : Registre parcellaire géographique  
**RRP** : Référentiel Régional Pédologique  
**RU** : Réserve utile  
**SAGE** : Schéma d'aménagement et de gestion des eaux  
**SAU** : Surface agricole utilisée  
**SDAGE** : Schémas directeurs d'aménagement et de gestion des eaux  
**SIG** : Système d'information géographique



# Introduction

Le monde est confronté aujourd'hui à un énorme défi : augmenter la production alimentaire de près de 50 % d'ici 2030. Cette prouesse sera vraisemblablement accompagnée d'une exploitation accrue des ressources ce qui mettra en danger l'équilibre naturel.

Par ses divers usages, l'eau constitue de loin la ressource la plus menacée. En 2004, on estime à 34 milliards de m<sup>3</sup> le volume d'eau prélevé en France métropolitaine pour satisfaire les activités humaines dont 81% en eaux superficielles et 19% en eaux souterraines. 28 milliards de m<sup>3</sup> sont restitués et 6 milliards sont totalement consommés. Avec une consommation nette moyenne de 2,88 milliards de m<sup>3</sup> par an en France, l'agriculture est désormais le premier consommateur (selon IFEN In FNE, 2008).

D'après un rapport publié par le 'programme des Nations Unies pour l'environnement' (UNEP) en 2003, la consommation actuelle en eau exerce une pression de plus en plus intenable sur cette ressource et le développement de l'activité agricole a introduit des modifications importantes dans les conditions d'équilibre des réservoirs naturels souterrains représentés par les nappes.

A titre d'exemple, la nappe de Beauce qui est considérée comme l'une des plus importantes nappes phréatiques de France connaît des perturbations très prononcées au niveau de son équilibre. Son niveau baisse fréquemment sous l'effet des prélèvements très élevés et des recharges hivernales très faibles. Face à cela, plusieurs mesures ont été mises en place : l'irrigation, premier usage de l'eau en Beauce, a été soumise à une gestion volumétrique à partir de 1999, d'autres programmes de mesure et de gestion ont vu le jour comme les SDAGE et le SAGE. Ces démarches ont apporté certes des améliorations au niveau de la gestion des ressources hydriques mais restent insuffisantes.

C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude où différentes mesures de gestion de l'eau seront testées dans le but de maîtriser les prélèvements et d'arriver à une exploitation optimale de la nappe. Cependant, la mise en place de ces politiques pose la question de leurs impacts sur les exploitations agricoles en termes d'assolement, de consommation en eau et de revenus.

L'objectif de cette étude est de mettre en évidence les conséquences de telles mesures sur l'économie des exploitations et de l'environnement. Pour répondre à cette question, des modèles bio-économiques seront construits à partir de données d'enquêtes et de références technico-économiques fournies par la profession agricole et les DDT et DRAAF. L'originalité de ces modèles sera la prise en compte de la dimension spatiale des exploitations vue la grande hétérogénéité que renferme le territoire du point de vue sols, climat, distribution des ressources hydriques etc. ce qui nous permettra de voir l'importance de la spatialisation à travers les comportements éventuellement différenciés des agriculteurs selon la localisation de leurs exploitations et les contraintes auxquelles ils sont soumis.

A partir des différentes simulations, on pourrait définir la mesure la plus incitative à l'économie de l'eau et qui aurait moins de répercussions sur les revenus des agriculteurs.

Le présent document est structuré en trois grandes parties :

- la première partie est consacrée à une brève analyse bibliographique des approches utilisées pour l'évaluation des politiques agricoles ainsi que leur application à l'échelle de l'exploitation, les politiques relatives à la gestion de l'eau avec comme exemple le cas de la Beauce, et à la fin de cette partie on dégagera la problématique et l'objectif de notre étude ;
- dans une seconde partie, nous présenterons la zone d'étude, la démarche méthodologique qui sera adoptée ainsi que les outils utilisés ;
- la dernière partie sera consacrée à l'analyse des résultats obtenus et leur discussion.



# Partie I.

## Analyse bibliographique

### Chapitre I. Quelle approche pour l'évaluation de l'impact des politiques publiques ?

L'activité agricole est nécessaire pour satisfaire la demande alimentaire de l'homme, mais elle peut impliquer également des perturbations au niveau de l'équilibre des ressources naturelles. Ces perturbations accompagnées d'une mauvaise gestion peuvent provoquer l'épuisement des ressources et ainsi avoir un impact négatif sur l'environnement.

Les questions environnementales sont devenues désormais une préoccupation majeure, affichée par de multiples agents dans leurs comportements sociaux, politiques et de plus en plus économiques et ce, afin de préserver ou de reconstituer de meilleures conditions de vie pour les populations, et d'assurer un développement économique et social durable (Louhichi *et al.*, 1999).

Les politiques agricoles intègrent donc de plus en plus des objectifs environnementaux : réduction des externalités négatives de l'agriculture ou production d'aménités positives. En articulation avec les politiques environnementales, elles sont à la recherche des instruments adéquats pour intervenir sur les choix techniques des agriculteurs. Ce sont en effet ces choix techniques qui déterminent non seulement la nature et le volume de l'offre de produits agricoles, mais aussi les conséquences environnementales de l'activité agricole.

#### **I. Approche bio-économique**

Pour évaluer l'impact des politiques publiques sur l'activité agricole et l'environnement, la recherche a proposé l'utilisation de diverses méthodes telles que les modèles bio-économiques, les systèmes multi-agents, la cartographie des risques pour l'environnement, l'analyse du cycle de vie...

Cependant, pour analyser les rapports entre les choix des techniques par les agriculteurs, la politique agricole et certains problèmes concernant l'environnement et les ressources naturelles, il est nécessaire d'employer les outils de modélisation les plus adéquats (Flichman et Jacquet, 2000a).

Analyser la durabilité économique et environnementale des systèmes de culture implique nécessairement la création d'indicateurs écologiques (taux de nitrate dans le sol, lixiviation, érosion...), agronomiques via des fonctions de production (irrigation, fertilisation, traitements phytosanitaire...) et économiques (marge de l'agriculteur...). Cependant, l'utilisation de ces indicateurs implique du fait de la complexité du système, la création de fonctions généralement linéaires reliant la production à l'environnement.

Pour cette raison, l'utilisation des modèles bio-économiques basés sur l'intégration des données agronomiques et économiques est de plus en plus adoptée pour évaluer les politiques publiques et dont les résultats peuvent dans certains cas servir de base à la négociation qui permet de prendre les décisions touchant à la fois à des aspects économiques et environnementaux (Flichman, 1997).

#### **1. Définition et objectif**

Les modèles bio-économiques sont issus d'un couplage des modèles agronomiques et économiques où les processus biologiques étudiés sont explicitement représentés. Dans le cas de l'agriculture, cette méthode repose sur une modélisation agronomique des techniques de production et de leur impact en terme de

rendements et d'externalités environnementales, intégrée à un modèle économique, le plus souvent d'optimisation sous contraintes (Flichman et Jacquet, 2000b).

Ils sont définis aussi par Janssen et Van Ittersum (2007) comme étant des modèles qui relient les formulations décrivant les décisions des agriculteurs en termes de gestion des ressources, à des formulations qui décrivent les possibilités de production actuelles et alternatives en termes de moyens nécessaires pour réaliser certains outputs et les externalités associées.

La modélisation bio-économique peut être utilisée comme cadre de négociation autour du choix des techniques de production en rapport avec la disponibilité des ressources naturelles et en considérant toutes les contraintes socio-économiques. Il s'agit de caractériser et de reproduire le fonctionnement de chaque élément du système analysé de la parcelle à la région en passant par l'exploitation. L'idée d'une telle approche est d'identifier et de caractériser des critères d'évaluation des systèmes de production afin de répondre aux préoccupations des différents acteurs.

## **2. Avantages**

Selon Janssen et Van Ittersum (2007), les modèles bio-économiques permettent l'évaluation de changement de politiques et l'innovation technologique. Ils sont basés sur les théories disponibles et la connaissance des processus agricoles. Ils ont certains avantages qui peuvent les distinguer des autres modèles :

- ✓ ils sont fondés sur une procédure d'optimisation sous contraintes ce qui correspond à la réalité des agriculteurs dont les ressources sont limitées ;
- ✓ de nombreuses activités, les restrictions et les nouvelles techniques de production peuvent être considérées simultanément, y compris les liens entre production végétale et animale (Weersink et *al.*, 2004) ;
- ✓ les effets de changement de paramètres, les prix par exemple, peuvent facilement être évalués par l'analyse de sensibilité ;
- ✓ ils peuvent être utilisés pour des prévisions à court terme et à long terme (Van Ittersum et *al.* 1998).
- ✓ l'application des modèles bio-économiques -quand ils sont génériques- est facilement reproductible même à une échelle plus large et sur des systèmes agricoles plus complexes.

## **3. Limites des modèles**

Dans certains cas, le manque de données nécessaires au calage des modèles bio-économiques pourrait remettre en cause leur validité et leur pertinence, et dans d'autres cas, il pourrait constituer une contrainte pour représenter la diversité des situations réelles observées.

## **4. La programmation mathématique dans les modèles bio-économiques**

En agriculture et avec le développement des modèles biophysiques, l'utilisation de l'approche bio-économique est devenue une tradition dans l'analyse des relations agriculture-écologie et l'analyse des politiques agricoles et environnementales. Elle est basée sur le couplage d'un modèle économique (faisant appel à la programmation mathématique le plus souvent linéaire) modélisant les décisions des agriculteurs en matière de gestion des ressources à un modèle biophysique estimant, selon divers choix techniques, les fonctions de production et d'externalités.

L'utilisation de la programmation linéaire par les économistes agricoles remonte aux années 50. Historiquement, elle a été développée à des fins militaires pendant la deuxième guerre mondiale par Georges Dantzig au sein du projet SCOOP qui avait pour tâche de calculer les plans logistiques de l'armée américaine.

Depuis la programmation linéaire est utilisée dans de nombreux processus de prise de décision où le décideur doit identifier et quantifier ses limites, contraintes de temps, de travail, d'argent, etc., et doit

spécifier une fonction objectif à maximiser (utilité) ou minimiser (coût). En économie agricole, la première utilisation de la programmation linéaire a été la détermination des plans de production optimaux au niveau de l'exploitation agricole.

Dès qu'ils ont eu connaissance de l'existence de modèles agronomiques, biophysiques, à la fin des années 80, les économistes agricoles ont essayé de s'en servir pour améliorer les bases techniques et les coefficients de leurs modèles (Benoit-Cattin, 1995).

Selon son usage, le modèle mathématique se qualifie d'une approche positive ou approche normative.

Flichman et Jacquet (2003) définissent l'approche positive comme une approche qui essaye de modéliser le comportement actuel de l'agriculteur alors que l'approche normative essaye de trouver la solution optimale pour l'allocation et la gestion des ressources afin de faire des recommandations à l'agriculteur.

La programmation mathématique est une technique permettant de représenter le fonctionnement d'une exploitation agricole, en réaction à un ensemble de contraintes. Le point fort de cette approche est de représenter précisément la complexité productive de l'exploitation agricole. Elle permet également d'étudier les effets de seuil et de calculer les rendements marginaux des facteurs de production (valeurs duales). Cette technique permet, en outre, de prendre en compte simultanément des informations relatives à la production, au prix et à la politique agricole.

## **II. Application à l'échelle de l'exploitation agricole**

L'exploitation est considérée comme l'unité où les innovations agro-écologiques commencent et où les politiques agricoles et agro-environnementales déclenchent des changements dans l'utilisation des terres et dans la production des externalités.

Les exploitations diffèrent largement du point de vue dotation en facteurs de production, spécialisation et surface utilisée... En conséquence de cette grande diversité, les réponses à certaines politiques ou innovations vont différer d'une exploitation à l'autre.

Ceci complique sérieusement l'élaboration et le choix de politiques efficaces et efficientes : ce qui peut être efficient et efficace pour une exploitation peut ne pas l'être pour une autre.

La typologie est utilisée pour représenter cette diversité, mais à elle seule ne suffit pas pour situer les exploitations par rapport au climat, type de sol, réserves hydriques etc., car souvent les typologies d'exploitations sont définies de manière globale à l'échelle d'un territoire, sans prendre en compte la diversité locale des conditions de production ce qui constitue une contrainte pour une application uniforme des modèles bio-économiques d'où la nécessité d'intégrer l'information spatiale dans ces modèles.

### **1. Spatialisation des exploitations agricoles**

La spatialisation signifie l'intégration de l'information géographique c'est-à-dire la localisation et le positionnement des exploitations sur un espace donné.

#### ***a. Importance de la spatialisation***

L'objectif principal de l'introduction de la dimension spatiale est de représenter au mieux les processus de localisation des activités agricoles à une échelle locale (Piet., 2002).

Elle permet d'avoir des informations supplémentaires concernant l'exploitation : type de sol, type de climat, localisation par rapport aux marchés, aux facteurs de production... etc.

La procédure de répartition spatiale est utilisée pour répartir des types d'exploitations sur des unités spatiales avec des contraintes bio-physiques plus homogènes au sein de petits territoires (unités géographiques), mais qui sont variables d'un territoire à l'autre.

En outre, la localisation des productions sur le territoire permet de mieux analyser le fonctionnement des filières, la spatialisation des prélèvements en eau ou des activités générant des externalités et les impacts sur les écosystèmes suivant les endroits dans lesquels ils se trouvent.

La spatialisation des données présente un intérêt particulier dans la gestion de l'agriculture (suivi du stress hydrique, des rendements), de l'eau (gestion de bassins versants, de périmètres irrigués), de l'environnement (modifications du paysage et de l'utilisation du sol, risques naturels), de la forêt (suivi de la production, du risque d'incendie), et de manière générale de toutes les ressources renouvelables (Vidal *et al.*, 1997).

### ***b. Spatialiser quoi et comment ?***

#### ➤ *Les données spatialisées*

Parmi les informations et les données qui peuvent être spatialisées, on peut citer :

- **les données météorologiques** : la spatialisation des données climatiques est aujourd'hui une exigence des utilisateurs. Elle est facilitée par le recours aux systèmes d'information géographique. La localisation des pluies peut se faire à l'aide de radars météorologiques, les températures aussi peuvent être spatialisées.
- **les données du sol** : aux différents types de sols correspondent des aptitudes agronomiques différentes qui vont conditionner le choix des assolements, les niveaux et les coûts de production. La spatialisation des données du sol se fait à l'aide de la cartographie et les SIG qui permettent de définir et de délimiter les unités de sol.
- **les eaux souterraines et les eaux superficielles** : pour mieux localiser les exploitations agricoles par rapport aux points de prélèvement (forages), barrages, nappes, rivières, ainsi que par rapport à la présence de réseaux collectifs d'irrigation...
- **l'environnement économique** : les unités de production agricole peuvent être localisées aussi par rapport à leur rapprochement ou éloignement du marché, des usines de transformation, des unités de transport et de commercialisation, des bassins d'approvisionnement, des ports d'exportation...

#### ➤ *Méthodes*

La représentation spatiale d'un territoire permet de témoigner des états successifs de modes d'occupation et d'utilisation des sols et de leurs changements passés et actuels de façon diachronique. Elle peut être effectuée à l'aide de chorèmes (Benoît, 1990), de SIG, de blocs diagramme (Michelin, 2000), de vues paysagères virtuelles (Joliveau, 2001) ou encore à l'aide de données de télédétection (Houet *et al.*, 2008).

## **2. Intégration de l'information spatiale dans les modèles**

La spécificité des modèles spatialisés est de distribuer dans l'espace les termes d'entrée et les paramètres du modèle. Cette caractéristique leur confère plus de souplesse mais les rend aussi plus désireux de données (Chahinian, 2004).

La spatialisation permet de choisir des scénarios et de développer des politiques en relation avec la répartition des exploitations agricoles dans l'espace : l'exploitation se trouvant sur un sol superficiel avec un climat plus au moins sec n'aura pas les mêmes données d'entrée dans le modèle et ne se comportera pas de la même manière face aux différents scénarios et politiques appliqués, qu'une exploitation se situant sur un sol profond dans une zone relativement plus humide.

# Chapitre II. La gestion de l'eau : une priorité pour les politiques publiques

Les politiques agricoles dans de nombreux pays ont favorisé le développement de l'irrigation et ont tenté de garantir la fourniture de l'eau pour les différents usagers. Des situations de tensions sur la ressource en eau résultent alors de ces politiques expansionnistes, dans lesquelles l'eau est massivement consommée par le secteur agricole à un prix subventionné.

Aujourd'hui, dans de nombreux cas de figure, la politique de croissance de l'offre en ressources hydriques a atteint ses limites ce qui a conduit les différents acteurs de gestion de l'eau à agir pour assurer une meilleure gestion de l'utilisation de l'eau et augmenter l'efficacité de l'usage et la durabilité de la ressource.

L'application d'une politique de gestion et la mise en place des mesures restrictives relatives à l'eau doit prendre en compte les besoins de tous les usagers et nécessite une vision globale du problème afin de prévoir les impacts qu'elles pourraient engendrer non seulement du point de vue technique mais aussi économique, social et environnemental.

## I. Instruments de gestion de l'eau

Il existe plusieurs instruments de gestion de l'eau qui peuvent être appliqués afin d'assurer une meilleure allocation de cette ressource, parmi ceux appliqués en France, on y trouve :

### 1. Les mesures réglementaires

Les mesures réglementaires, sous des dénominations variables (quotas, gestion volumétrique, volumes prélevables, autorisations de prélèvement, restrictions d'usages, tours d'eau...) sont les instruments de gestion les plus fréquemment rencontrés dans la pratique en France. Ils consistent à limiter la quantité maximale de ressources à consommer. Trois types de quotas peuvent être distingués :

- le quota volume qui correspond au volume maximal prélevable par unité de référence et par unité de temps, il est défini généralement en fonction du taux de renouvellement de l'aquifère ;
- le quota débit dans lequel le débit de prélèvement est limité ;
- enfin le quota temps utilisé lorsque les volumes prélevés sont difficiles à mesurer en limitant le temps pendant lequel les usagers sont autorisés à prélever (tour d'eau).

### 2. La taxation de l'eau

Pour optimiser l'usage de ressources naturelles, la taxe est considérée comme un instrument incitatif de premier choix en économie de l'environnement. En France, ce mécanisme est mis en place sous forme de redevance prélèvement instauré par les Agences de l'Eau. Contrairement à la tarification, ce principe est sans rapport avec les coûts liés à un service mais consiste plutôt à payer une taxe pour chaque mètre cube d'eau consommé dans le but d'une utilisation plus efficiente de la ressource, le prix peut dépendre de la valeur marginale de l'eau et sa mise en place est fonction de la surface irriguée, du volume prélevé, du type de cultures... L'efficacité d'un tel instrument est remise en cause dans de nombreuses études où il a été démontré par Gleyses en 2006 que le montant de cette taxe est très insuffisant pour inciter à l'économie d'eau et il serait nécessaire de multiplier son montant par 15 pour qu'il devienne incitatif, d'autre part Le Mat, Loubier et *al.* dans une étude réalisée en 2008 montrent qu'une hausse de la redevance aurait simplement pour conséquence de réduire le revenu des irrigants.

### 3. La tarification d'un service

Ce type d'instruments peut prendre plusieurs formes : forfaitaire, binomiale... (Pour plus de détails, voir partie II, chapitre V.1), il vise à couvrir une partie des coûts d'exploitation et de maintenance des infrastructures et éventuellement une fraction du coût d'investissement assurés par le service de réalimentation de cours d'eau. Il peut servir aussi comme un moyen d'assurance de l'équilibre budgétaire de la structure qui fournit le service (gestionnaires de réseaux collectifs d'irrigation) (Loubier, 2010). Cependant, il n'incite pas les irrigants à l'économie d'eau même en cas de tarification binomiale mais une modification à la marge de la partie variable du tarif pourrait avoir un impact sur la consommation si l'augmentation est assez élevée, mais à partir de quel seuil cela devient possible et à quel prix ?

### 4. Les incitations

On distingue deux types de systèmes incitatifs en fonction de la nature de l'objectif visé :

#### *a. Les incitations directes : MAE et aides au désinvestissement*

Les incitations directes visent dans un premier lieu à réduire les consommations en eau. On peut citer les MAE ou bien les aides au désinvestissement. Le principe est d'indemniser (en une seule fois pour l'aide au désinvestissement ou bien étalé sur 5 ans pour les MAE) la perte de revenu subie par un agriculteur qui accepterait de renoncer à l'usage d'une ressource.

#### *b. Les incitations indirectes : politiques agricoles et d'hydraulique*

Deux systèmes d'incitations indirectes sont distingués : les modalités de la politique agricole commune et la politique de soutien à l'hydraulique agricole.

Les réformes appliquées à la PAC réduisent l'intérêt à développer les surfaces irriguées qui autrefois bénéficiaient des primes 'surprimes irrigation', ces dernières sont réduites de 75% aujourd'hui.

La seconde incitation indirecte concerne la politique de soutien à l'hydraulique agricole : en supprimant les subventions pour le renouvellement des infrastructures, la consommation en eau devrait diminuer, mais une étude réalisée en 2007 par Loubier et Moreau montre que l'effet contraire est envisageable. En effet, certains agriculteurs sont contraints de prendre plus de risques en irriguant plus intensément pour compenser la baisse de revenu liée à l'augmentation des dépenses (emprunts plus importants).

### 5. Les marchés de l'eau

Montginoul et Strosser (1999) ont défini le marché de droits d'eau comme « un lieu d'échange de droits d'eau entre des individus ou des collectivités. Un droit d'eau correspond à un quota de prélèvement de la ressource en eau, qui peut être sous la forme d'un débit prélevable, d'un volume disponible, ou d'une part de la réserve ou du flux ». Les échanges vont se faire selon la valeur marginale de l'eau, les usagers pour lesquels la valeur marginale de l'eau est plus faible seront disposés à céder leur droit contre rémunération. L'objectif de ce système consiste à améliorer l'efficacité économique de l'allocation de la ressource.

### 6. Les subventions

D'autres instruments de gestion pourraient conduire à la réduction de la consommation en eau comme la mise en place de subventions destinées à soutenir et à développer les cultures moins exigeantes en eau comme le colza, le tournesol... ou à financer en partie l'installation d'un matériel d'irrigation et des équipements plus économes comme le système goutte-à-goutte.

## II. Cas de la Beauce

### 1. Contexte

La nappe de Beauce a subi à plusieurs reprises des baisses de son niveau suite à des phénomènes climatiques (comme la sécheresse du début des années 1990 avec des recharges hivernales trop faibles) et des modifications du contexte économique agricole (réforme de la PAC de 1992). En effet, la région a connu des changements de modes et de types de cultures induits par cette réforme (dont la principale mesure est d'accorder une prime à l'hectare progressivement croissante de 1992 à 1996 aux cultures de blé, de maïs, d'orge et de pois sur surfaces irriguées). La part des surfaces irriguées est ainsi passée d'un tiers à deux tiers (en 1995) des superficies cultivées (Bonnal et Favard, 2000). Cette évolution s'est accompagnée de l'utilisation intensive de ressources en eau pour irriguer la quasi-totalité de la région afin de réaliser un rendement maximal (Jabbour, 2008).

Le seuil critique de la nappe a été atteint en 1993 et depuis, son niveau connaît des hauts et des bas, ce qui a suscité l'inquiétude des différents acteurs de la gestion de l'eau et les a conduits à prendre des mesures de rationnement plus pertinentes, en particulier en ce qui concerne les agriculteurs irrigants.

### 2. Bilan des mesures prises autour de la gestion de l'eau en Beauce

Depuis le début des années 1990, les prélèvements dans la nappe ont fait l'objet de mesures préfectorales spécifiques, mises en place sous forme de restrictions. Petit (2009) en a distingué plusieurs phases successives :

#### *a. Restrictions sans coordination des politiques (1993-1994)*

Ce sont des restrictions sous forme d'interdiction d'irriguer certains jours de la semaine en période estivale suite à des réunions organisées par la DRAF de la région Centre. Cette période coïncidait avec un niveau de la nappe particulièrement bas, ce qui avivait les tensions entre les acteurs.

#### *b. Charte « Nappe de Beauce » et définition de seuils d'alerte (1995-1998)*

En mars 1995, un accord appelé « charte Nappe de Beauce » est signé entre l'administration et les syndicats d'irrigants. Cette charte permet le déclenchement des mesures de limitation de l'irrigation à partir du suivi d'un indicateur du niveau moyen de la nappe et de la détermination de trois seuils d'alerte retenus comme références.

Le suivi du niveau de la nappe de Beauce a été réalisé par la direction régionale de l'environnement du Centre à Orléans. Les trois seuils mentionnés ont été repris par la suite dans les SDAGE Loire-Bretagne.

La charte « Nappe de Beauce » est le point de départ d'une gestion réglementaire négociée des usages. Un nouveau système d'attribution de quotas de prélèvements a été mis en place à la fin des années 90. Il a été décidé en accord avec le groupe inter-bassins Beauce qui fixait le seuil de 450 millions de mètres cubes comme seuil maximal prélevable pour l'irrigation en moyenne annuelle.

#### *c. Gestion par quotas et procédure SAGE (1999-2008)*

Depuis la campagne d'irrigation 1999, un système de restriction plus souple a été mis en place, il permet d'attribuer à chaque irrigant un volume total prélevable sur la nappe de Beauce compte tenu :

- du niveau de la nappe au début de la période d'irrigation ;
- de la situation géographique de l'irrigant et du type de terrain qu'il occupe ;
- du nombre d'hectares à irriguer par exploitation.

Ainsi, le niveau de la nappe conditionne le volume prélevable par l'ensemble des irrigants pour toute la période d'irrigation.

➤ Procédure SAGE

Pour une bonne mise en œuvre des SDAGE qui sont des politiques de gestion à l'échelle d'un bassin, ils ont été déclinés à partir de 1998 en SAGE, nappe de Beauce dans ce cas. Ce dernier est un outil local de planification à portée juridique établi de manière collective et vise :

- le respect des exigences réglementaires (DCE, Loi sur l'Eau, SDAGE) ;
- le respect des exigences économiques et environnementales (satisfaire les besoins en eau de tous les usagers et maintenir le bon fonctionnement des cours d'eau).

Avec la mise en place du projet SAGE, la possibilité de report d'un volume d'eau non consommé une année sur l'autre, a disparu.

Le projet de SAGE a été adopté par la Commission Locale de l'Eau (CLE), le 15 Septembre 2010 et le début de sa mise en œuvre est prévu pour le printemps 2012 (CLE, 2010).

## Chapitre III. Problématique et objectif de l'étude

Comme il a été souligné au paravent, la demande en eau dans la Beauce est en constante augmentation, la quantité de cette ressource nécessaire aux usages domestiques, industriels, environnementaux et surtout agricoles devient de plus en plus importante. Avec 90% du territoire qui est en SAU, l'agriculture constitue l'activité prédominante de la région et la plus consommatrice d'eau. Confrontée à la part des superficies irriguées qui augmente et à l'irrigation qui s'étend jusqu'aux sols profonds, la Beauce se retrouve aujourd'hui face à un problème majeur de surexploitation de cette ressource qui est représentée principalement par la nappe de Beauce. Cette dernière connaît régulièrement des baisses de son niveau ajouté à cela le problème de réalimentation des cours d'eau.

En effet, cette augmentation de la demande en eau a conduit dès le début des années 90 à une baisse importante du niveau piézométrique de la nappe, qui est liée aussi à la succession d'années sèches. A partir de là, la gestion volumétrique a été décidée, les agriculteurs possédaient désormais des volumes d'eau limités, dépendant en grande partie du niveau de la nappe.

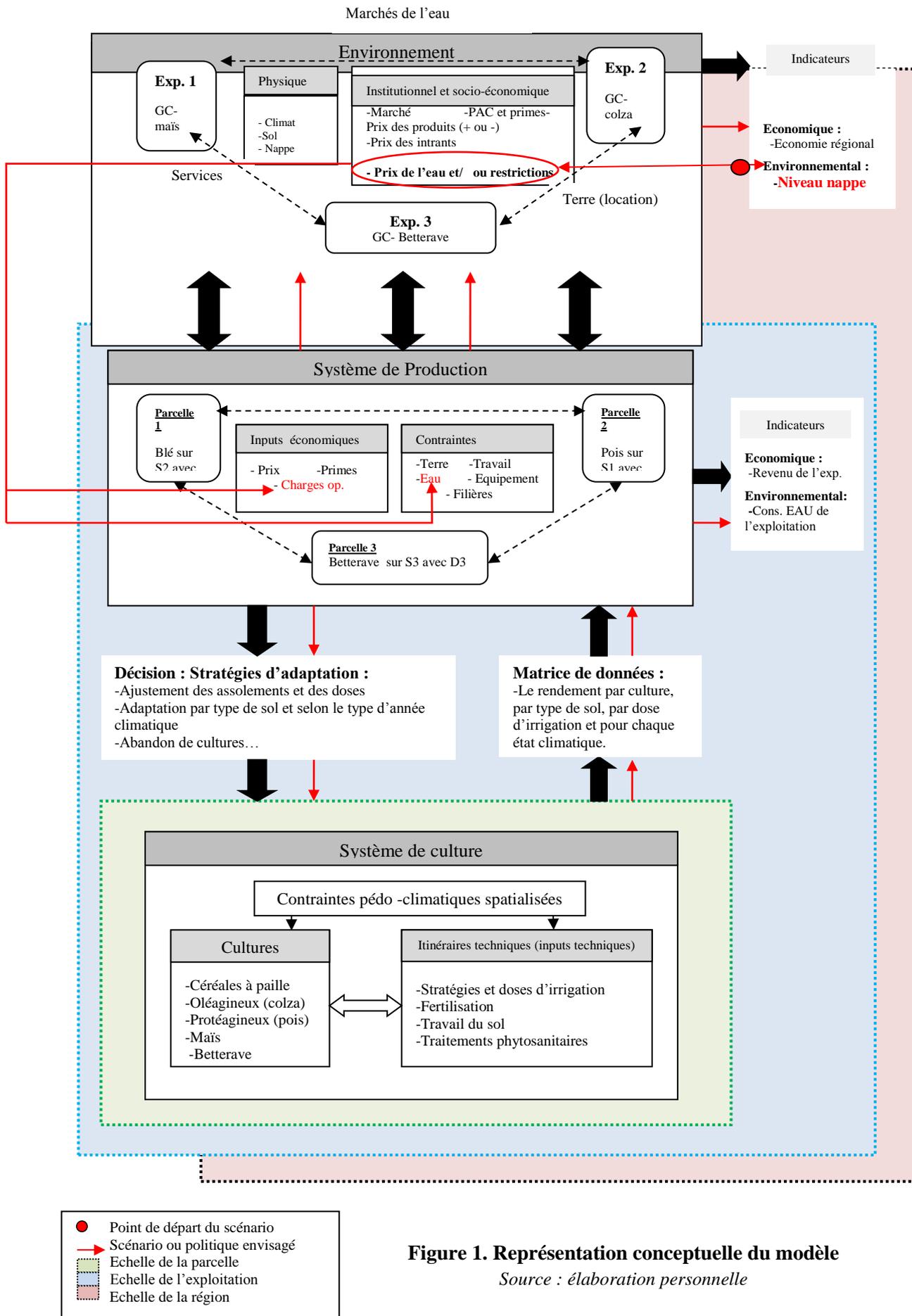
Pendant les premières années qui ont succédé la mise en place de cette procédure, les coefficients de nappe qui réduisent les volumes de référence attribués aux exploitations n'ont pas été très restrictifs. Cependant, à partir de 2007 et avec des années de sécheresse qui se répètent, ces coefficients ont commencé à augmenter et les volumes d'eau deviennent plus contraignants (DDAF Eure-et-Loir, 2011) (Annexe I, tableau 1). De plus, on a assisté à une évolution des différentes politiques publiques qui visent à réduire la consommation en eau et restreindre plus fortement les volumes prélevables pour l'irrigation. Plusieurs études et ateliers participatifs ont été réalisées (Brunel, 2007 ; 2009) afin de mesurer l'impact que pourraient avoir les différentes politiques mises en place sur l'évolution de la consommation en eau et leurs répercussions sur les exploitations agricoles et les revenus des agriculteurs. Cependant, ce qui n'a pas été abordé, c'est l'impact différencié que pourraient avoir ces mesures selon la localisation des exploitations étudiées du fait qu'au sein de ce grand territoire, on n'a pas les mêmes contraintes biophysiques et climatiques : on assiste à une grande diversité des sols et un climat assez hétérogène d'une zone à l'autre.

La question qui se pose c'est donc : quel serait l'impact des différentes politiques et mesures de gestion sur les exploitations agricoles si on prenait en compte la variabilité spatiale du milieu ?

L'objectif de cette étude consiste, au moyen de modèles micro-économiques de comportement des agriculteurs qui seront construits, à étudier l'impact des différents instruments de gestion envisagés sur des exploitations appartenant à des zones très hétérogènes du point de vue nature du climat, types de sols... et dans un but plus large : arriver à une exploitation optimale de la nappe à l'échelle régionale qui permettra de garantir la quantité d'eau nécessaire aux différents usages et d'assurer un débit d'étiage suffisant pour répondre à la demande et l'équilibre des milieux naturels aquatiques et pourquoi pas maintenir un niveau piézométrique de la nappe satisfaisant.

Dans un premier temps, on analysera les conséquences des mesures envisagées sur le plan de production et les stratégies d'adaptation que les agriculteurs choisissent et la consommation en eau qui en résulte et dans un deuxième temps, on étudiera leurs répercussions sur l'économie des exploitations. La spatialisation dans ce présent travail a comme rôle de spécifier les contraintes auxquelles sont soumises les exploitations selon leur localisation : à l'aide des outils appropriés, elle va classer notre terrain d'étude en zones contrastées, caractérisées par des contraintes pédo-climatiques différentes d'une zone à l'autre. Les résultats et les impacts seront probablement différents d'une exploitation à l'autre en fonction de sa localisation spatiale et la zone à laquelle elle appartient.

Un schéma conceptuel qui retrace le cadre général de l'étude et les échelles spatiales est représenté dans la figure ci-après (figure 1.)



**Figure 1. Représentation conceptuelle du modèle**

Source : élaboration personnelle

## Partie II. Matériel et méthodes

### Chapitre I : Présentation de la zone d'étude

#### I. Situation géographique

La zone qui fait l'objet de cette étude est la Beauce et plus précisément le périmètre du SAGE nappe de Beauce, qui se situe au sud-ouest de la région parisienne. Cette zone est située au-dessus d'une réserve d'eau, la nappe de Beauce, qui s'étend sur plus de 9 000 km<sup>2</sup>. La Beauce est localisée sur six départements : le Loiret, l'Eure-et-Loir, le Loir-et-Cher, la Seine-et-Marne, les Yvelines et l'Essonne. Elle appartient donc à deux régions administratives : le Centre et l'Ile-de-France (Figure 2).

Figure 2. Carte de localisation de la zone d'étude (la Beauce)



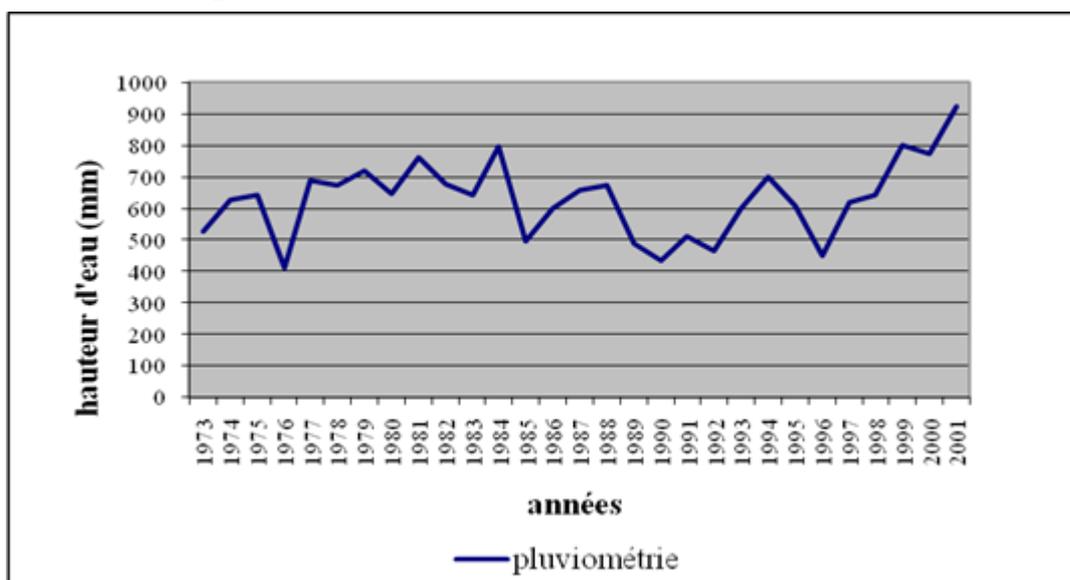
Source : [www.eau-seine-normandie.fr/fileadmin/.../sage\\_nappe\\_de\\_beauce.pdf](http://www.eau-seine-normandie.fr/fileadmin/.../sage_nappe_de_beauce.pdf)

## II. Climat

Le climat de la Beauce est de type continental tempéré avec une influence océanique.

Dans la figure 3, et sur une période de mesure qui s'étale sur trente ans (de 1973 à 2002), on remarque que les précipitations annuelles varient entre 400 et 900 mm/an, avec une moyenne de 630 mm sur les 30 ans, ce qui est inférieur à la moyenne nationale qui est de 700 mm/an.

**Figure 3. Pluviométrie annuelle sur 30 ans sur le territoire de la Beauce**



Source : <http://eduterre.inrp.fr/eduterre-usages/nappe/html/Ressources/climat/climat.htm>

En été, les températures moyennes maximales s'élèvent à 25°C et en hiver, les températures moyennes minimales s'abaissent à 0°C. La Beauce est l'un des plateaux les plus secs de France.

## III. Sols

La Beauce est un vaste plateau calcaire dont la riche couche de loess<sup>1</sup> la destine à l'agriculture intensive (betterave sucrière, céréales, maïs...).

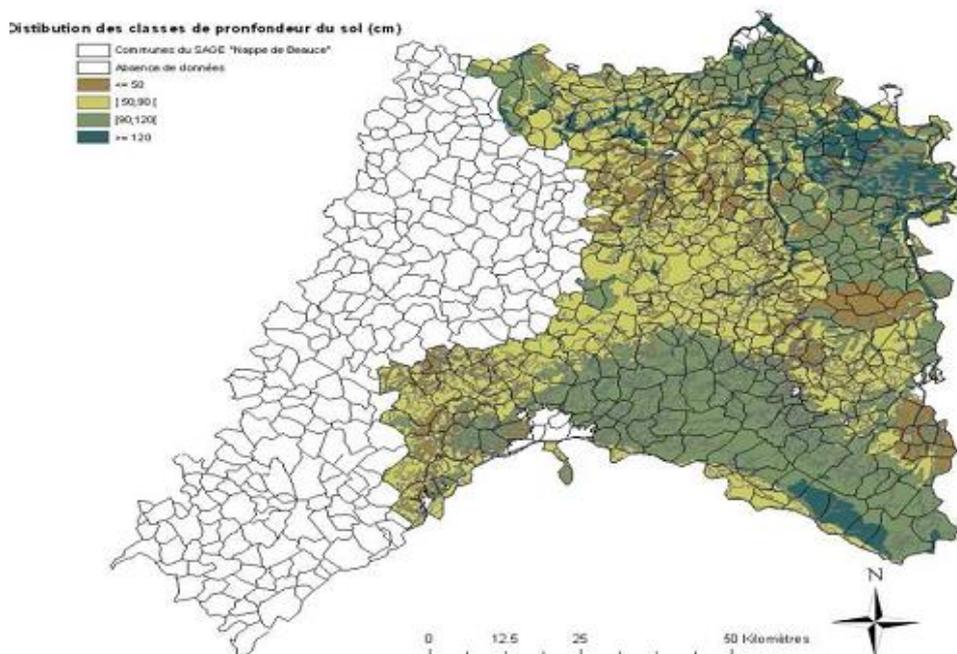
A partir de ces limons loessiques, des sols bruns se sont développés, assez hétérogènes d'une zone à une autre, on y trouve principalement des sols bruns calciques peu épais (60 à 70 cm) et des sols bruns lessivés qui sont plus épais (jusqu'à 120 cm) (Boussard et al., 1994).

D'après une étude réalisée en 2010 par Buisson dans le cadre d'un diagnostic territorial de l'agriculture sur la même zone d'étude (Ile de France et Loiret), les sols du Loiret sont principalement de classe moyenne du point de vue profondeur (entre 50 et 120 cm) avec une texture soit grossière (sable), soit fine (argile), alors que ceux de l'Ile-de-France sont plus hétérogènes avec une texture plus fine (limoneux argileuse). Les sols profonds sont dix fois plus présents ; ils se situent dans les zones de forêt telle que la forêt d'Orléans (au sud-est) ou de Fontainebleau (au nord-est) et dans le fond des différentes vallées qui

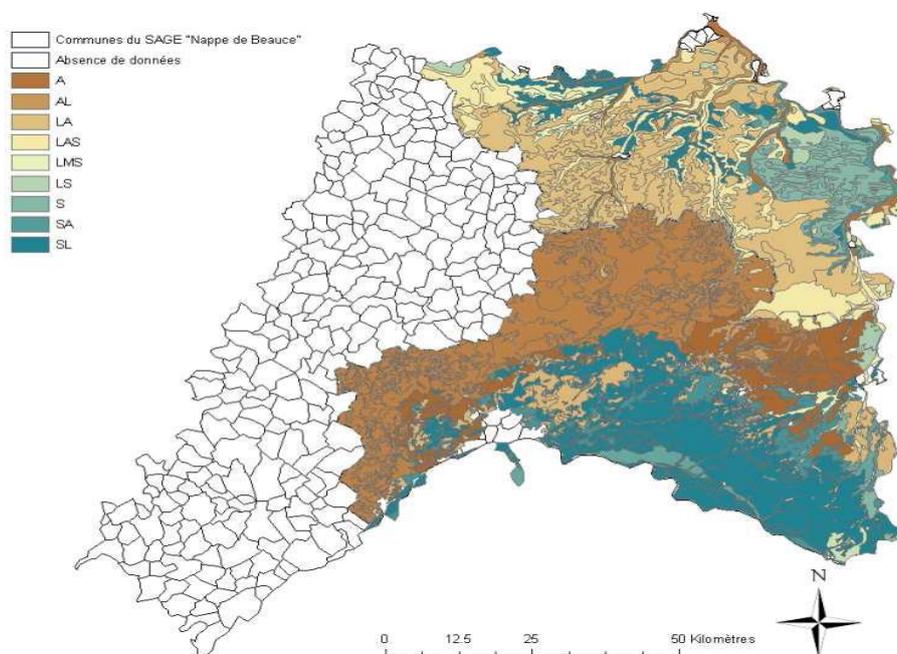
<sup>1</sup> Limon d'origine éolienne (déposé par le vent), témoin des phases climatiques froides et steppiques. Il conduit à la formation de sols profonds et fertiles.

parcourent la zone. Les sols les plus superficiels (inférieurs à 50 cm) se situent dans les versants de ces vallées (Figure 4 et 5).

**Figure 4. Distribution des classes de profondeur du sol** (Buisson, 2010 à partir des données du RRP de l’Ile-de-France et du Loiret).



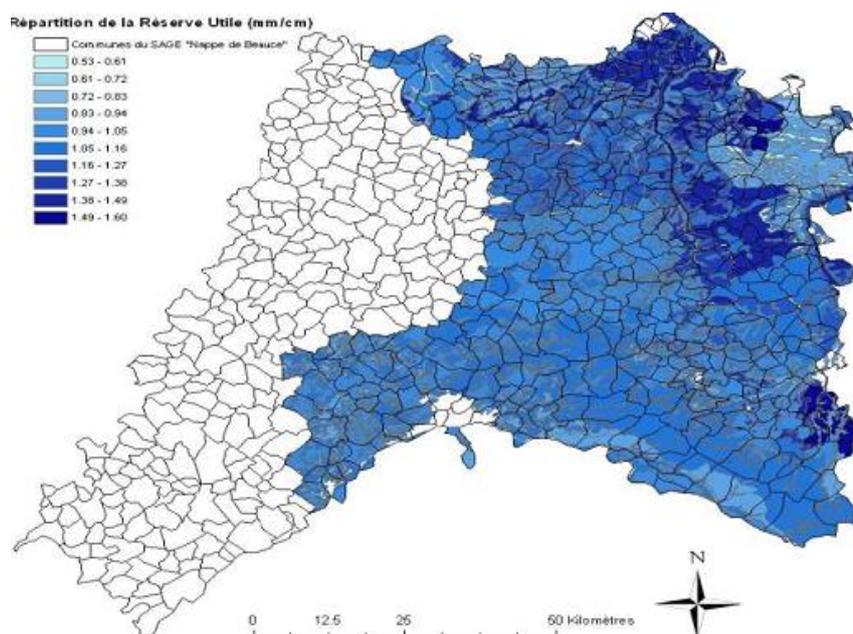
**Figure 5. Distribution des textures des horizons de surface d’Ile de France et du Loiret** (Buisson, 2010 à partir des données du RRP de l’Ile-de-France et du Loiret).



On déduit donc une grande hétérogénéité dans la distribution sur le territoire des différents types de sol dans la Beauce.

La RU associée à ces sols est variable d'une zone à l'autre selon le type de sol et la localisation du site d'étude : on trouve des zones où la réserve utile (RU) est très importante et d'autres où elle l'est moins, à titre d'exemple, les sols du Loiret ont une réserve utile moyenne (83 % de ses sols ont une RU comprise entre 0,94 et 1,16 mm.cm<sup>-1</sup> de sol) alors que les valeurs de la RU de l'Ile-de-France sont plus importantes (71% des sols de l'Ile-de-France ont une RU supérieure à 1,05 mm.cm<sup>-1</sup>) (Buisson, 2010) (Figure 6).

**Figure 6. Distribution de la Réserve Utile** (Buisson, 2010 à partir des données du RRP de l'Ile-de-France et du Loiret).



#### IV. Ressources hydriques : la nappe de Beauce

La Beauce est située au-dessus d'une réserve d'eau, la nappe de Beauce qui appartient à deux bassins hydrographiques qui relèvent de deux agences : Loire-Bretagne et Seine-Normandie (Figure 2). La capacité de stockage de cette nappe est estimée à 20 milliards de m<sup>3</sup>. Elle s'alimente de manière quasi exclusive par les pluies efficaces de son domaine d'affleurement et constitue la source principale d'alimentation, en eau potable et en eau d'irrigation. Elle présente donc un intérêt économique très important.

La Beauce est traversée par plusieurs rivières dont l'Eure au nord et le Loir au sud-ouest sont les plus importantes. Leurs affluents ont comme sources des résurgences de la nappe phréatique et donc sont très sensibles à son niveau ce qui fait d'elle une ressource stratégique.

La qualité de l'eau de la nappe de Beauce est dégradée par la présence de plusieurs polluants principalement d'origine humaine. Là où elle n'est pas protégée par les couches géologiques imperméables qui la constituent et dans les secteurs où il existe des forages mettant en relation plusieurs de ses niveaux, la nappe peut être polluée (SAGE nappe de Beauce et des milieux aquatiques associés, 2003).

▪ *Les prélèvements*

Les prélèvements pour l'alimentation en eau potable (80 millions de m<sup>3</sup> /an) et pour l'industrie (20 millions de m<sup>3</sup>/an) sont relativement constants dans le temps.

En revanche les prélèvements pour l'irrigation dépendent des conditions climatiques printanières et estivales. Ils varient ainsi de 150 millions de m<sup>3</sup> en année humide à 450 millions de m<sup>3</sup> en année sèche (Etat des lieux..., 2003).

## **V. L'agriculture beauceronne**

La Beauce est une vaste plaine très fertile couvrant une superficie d'environ six cent mille hectares (6000 km<sup>2</sup>) avec une population estimée en 2003 à environ 1,4 millions d'habitants dont 1 million est alimenté en eau potable par la nappe de Beauce. La densité de population est faible (20 habitants/km<sup>2</sup>) (Etat des lieux..., 2003).

L'agriculture y occupe une place prépondérante avec 90 % du territoire en SAU caractérisée par une forte dominance de la céréaliculture (blé, orge, maïs), pratiquée sur des exploitations de grande taille (100 ha) à champs ouverts (openfields) grâce à ses limons de qualité et à son relief plat. Ce développement de l'agriculture a été favorisé par les politiques productivistes et le développement de la mécanisation qui ont permis depuis les années 1950 d'intensifier la production et de diversifier les cultures au détriment de l'élevage.

Bien que les céréales soient les cultures dominantes en Beauce, d'autres cultures, comme la betterave à sucre, les cultures maraichères ou la pomme de terre y sont aussi produites. La situation au contact de l'agglomération parisienne est très favorable à la commercialisation des produits ce qui a fait d'elle, autrefois et encore aujourd'hui, le grenier à blé de France.

L'assolement pratiqué dans cette zone dépend entre autres, du type et de la profondeur du sol dans lequel est localisée la parcelle, en effet les sols bruns lessivés sont plus fertiles et renferment une réserve hydrique plus importante que les sols bruns calciques. De ce fait, les contraintes liées au sol et à la ressource en eau sont différents d'une zone à l'autre. Cette hétérogénéité spatiale conduit donc à une diversification au niveau des cultures mises en place.

Cependant, la plupart de ces cultures sont irriguées et l'irrigation se fait sur deux périodes :

- le blé tendre et le blé dur, l'orge et le pois protéagineux au printemps ;
- le maïs, la betterave et les cultures spéciales (semences, légumes de plein champ, cultures aromatiques et médicinales) en été.

A l'origine, l'irrigation était pratiquée sur des sols peu profonds pour faire face aux déficits pluviométriques, actuellement même les exploitations situées dans des zones où les sols sont profonds sont irriguées. L'eau est désormais considérée comme moyen d'assurance de qualité et de quantité pour les productions traditionnelles et comme outil de diversification vers d'autres cultures comme les cultures légumières qui sont plus exigeantes en cette ressource. Cette irrigation s'effectue presque exclusivement à partir de captages dans la nappe de Beauce.

L'activité agricole induit une activité industrielle agroalimentaire développée avec sucreries et conserveries. D'autres activités industrielles coexistent également telles que l'extraction de matériaux, verrerie et métallurgie. Toutes ces activités sont consommatrices d'eau, avec une exigence de qualité « eau potable » pour certaines.

## Chapitre II : Démarche générale et choix des outils

Avec la place de l'irrigation qui s'est renforcée au cours du temps dans la Beauce et le rôle important qu'elle joue dans la contribution au revenu des agriculteurs, ces derniers s'inquiètent des changements de cadre de gestion de l'eau et des répercussions des différentes mesures envisagées sur leurs systèmes de production et leur revenus.

Il s'agit alors, dans le cadre de l'étude, de :

- mesurer l'impact des mesures de gestion envisagées sur l'assolement et les stratégies d'irrigation au niveau de l'exploitation ;
- analyser les conséquences de ces changements sur les revenus des agriculteurs ;
- tester l'efficacité d'un ensemble de mesures de gestion envisageables.

La réponse à ces questions nous permettra d'évaluer la faisabilité et l'acceptabilité de telles mesures qui devraient dans un premier lieu réduire la consommation et dans un second lieu garantir un revenu assez stable aux agriculteurs.

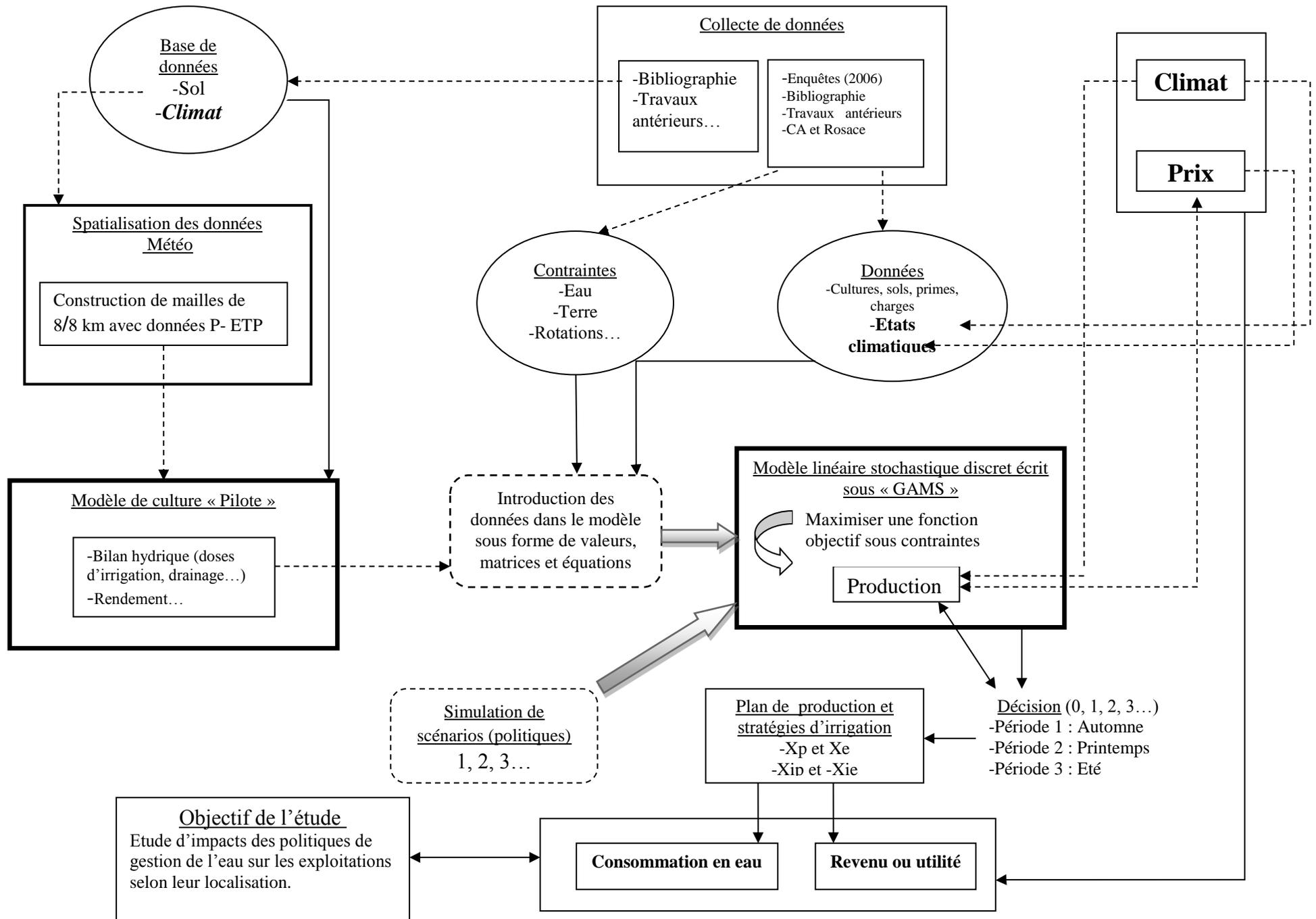
La démarche générale suivie dans cette étude repose sur trois principales étapes :

1. une phase d'analyse des données disponibles et de collecte de données manquantes, cette phase vise à caractériser les systèmes de production existant. Elle repose à la fois sur une revue bibliographique des typologies d'exploitations irrigantes réalisées dans la région d'étude (Brunel, 2007) et sur les travaux antérieurs réalisés dans le même cadre (Morardet et Hanot, 2000 ; Buisson, 2010).
2. une phase de modélisation :
  - *bio-physique* : à l'aide d'un modèle de culture (Pilote) qui va calculer les rendements et les doses d'eau associées à partir de données climatiques spatialisées et des données relatives aux sols aux cultures et aux itinéraires techniques ;
  - *économique* : cette étape est basée sur le choix et la construction d'un modèle représentatif des systèmes de production et correspondant le mieux à l'objectif visé, et dans lequel sont intégrées les données recueillies lors de la première étape et celles calculées par Pilote.

Un seul modèle est construit par type d'exploitation, ce modèle -écrit sous langage GAMS- va décrire les contraintes techniques et économiques auxquelles est soumise l'exploitation et va reproduire (après la phase de calage) les choix observés des agriculteurs en termes d'assolement et stratégies d'irrigation.

3. Enfin, la dernière phase de cette étude consiste à définir et à simuler différents scénarios de gestion de l'eau tels que la réduction du volume de référence, la mise en place de marchés de l'eau ou d'autres instruments de gestion comme la redevance prélèvement de l'Agence de l'Eau ou les aides au désinvestissement et à analyser leurs conséquences sur les exploitations.

La figure 7 schématise la démarche générale adoptée.



**Figure 7. Représentation schématique des principales étapes et éléments intervenant dans la modélisation bio-économique**

Source : *Elaboration personnelle*

# Chapitre III. Présentation des exploitations et source des données utilisées

Le champ d'application de notre approche concerne les exploitations irrigantes situées dans le périmètre SAGE nappe de Beauce. Ce choix est justifié par la spécificité agricole de la région (céréales, betterave, oléagineux, protéagineux, cultures spéciales, etc.) avec une agriculture irriguée de plus en plus développée, par ses caractéristiques climatiques qui font d'elle l'un des plateaux les plus secs de France et enfin par sa localisation au-dessus d'une nappe dont le niveau piézométrique connaît une baisse fréquente.

## I. Typologie

Vu le temps disponible et le nombre d'irrigants en Beauce, nous ne pouvons pas nous permettre de réaliser l'étude à l'échelle individuelle (exploitation), c'est pourquoi nous nous attachons dans un premier temps à simplifier la complexité du fonctionnement des exploitations par l'élaboration d'une typologie des exploitants, permettant de regrouper les exploitations qui ont un comportement identique vis à vis de l'eau. Cela nous permet alors de construire un seul modèle par type d'exploitation.

La typologie consiste à classer un maximum d'exploitations dans des types en respectant deux contraintes : une hétérogénéité élevée entre chacun des types et une homogénéité des exploitations au sein de chaque type. Elle vise dans notre cas à caractériser la diversité des systèmes et des stratégies de production et d'utilisation de l'eau des exploitations.

Compte tenu des contraintes de temps, nous nous sommes basés sur une typologie déjà existante, les enquêtes réalisées par Brunel (2007) ont permis de mettre en évidence 4 types d'irrigants aux orientations et pratiques d'irrigation différentes. Les regroupements de cultures réalisés ont pour objectif de trier les exploitations en fonction des cultures qu'elles irriguent au printemps et en été et des filières dans lesquelles elles sont engagées afin de caractériser la marge de manœuvre et la facilité d'adaptation des exploitations face à une restriction en eau.

Les cultures sous contrat (légumes, semences, plantes aromatiques et médicinales) interdisent une restriction d'eau sous peine de diminution de la qualité des productions et de risque de ne pas pouvoir renouveler le contrat. Les cultures de betterave sont exigeantes en eau mais supportent mieux les restrictions que les cultures sous contrat. Pour les cultures en maïs, elles consomment beaucoup d'eau, mais laissent une souplesse d'adaptation : en cas de restriction, on peut diminuer les surfaces consacrées à cette culture. Enfin, la culture de colza qui est conduite en sec sert le plus souvent d'alternative en cas de fortes restrictions.

Ainsi les 4 types d'exploitations sont distingués. Leur SAU est de 100 ha chacune (choix subjectif afin de faciliter la comparaison) (Figure8) :

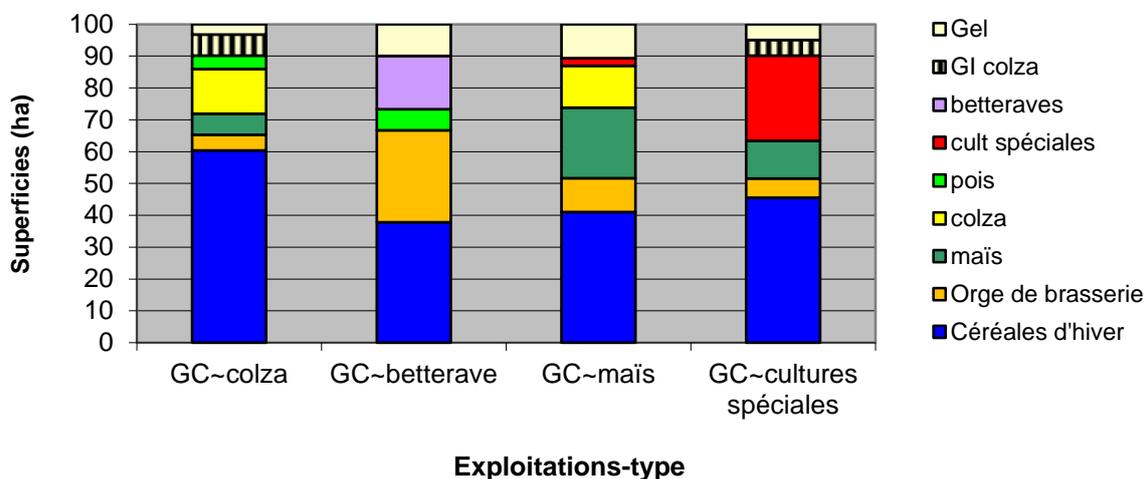
- exploitation-type : Grandes-cultures / colza qui représente 31 % de la SAU
- exploitation-type : Grandes-cultures / betterave : 30 %
- exploitation-type : Grandes-cultures / maïs : 17%
- exploitation-type : Grandes-cultures / cultures spéciales : 12 %

Les 10% restant correspondent aux surfaces fourragères et autres oléagineux, qui n'ont pas été pris en considération dans l'attribution des différents types.

Les deux premiers types concentrent chacun près d'un tiers des superficies.

Pour toutes les exploitations types, les céréales à paille (céréales d'hiver et orge de printemps (de brasserie)) représentent plus de 50 % de l'assolement, leur différenciation se fait sur les autres productions, spécifiques d'une période d'irrigation ou représentatives d'une filière (Brunel, 2007).

**Figure 8. Assolement comparé des exploitations-type (Brunel, 2007).**



## II. Caractéristiques de l'exploitation-type retenue

L'étude se déroule sur la campagne agricole 2007-2008, on aurait pu travailler sur 2010, mais vu que les données du RGA 2010 nécessaires pour le calage du modèle, n'étaient pas encore disponibles, il nous a semblé plus cohérent de modéliser le comportement de l'agriculteur en se basant sur les données de la campagne 2007-2008 et de comparer par la suite les premiers résultats (assolement) avec les résultats du RPG 2008 afin de valider le modèle.

La modélisation n'a concerné qu'un seul type d'exploitation : le type Grandes-cultures/betterave. Ce type a été retenu en raison de l'importance de la part de la SAU qu'il occupe (30 % de la SAU), de la diversité des cultures qu'il produit ainsi que de l'existence de deux groupes de cultures irriguées à des périodes différentes (cultures irriguées au printemps et cultures irriguées en été). Ce groupe d'exploitations est localisé principalement dans le centre de la Beauce au nord du département du Loiret où la zone est propice à la mécanisation et où les sucreries sont principalement situées.

Cette exploitation est caractérisée par une SAU moyenne de 100 ha (Rosace, 2011) avec 8 principales cultures, sur l'ensemble de ces cultures, on peut en distinguer 2 groupes en fonction de la période d'irrigation :

- les cultures irriguées au printemps : blé tendre d'hiver, blé dur d'hiver, orge d'hiver, orge de brasserie, pois protéagineux et colza.
- les cultures irriguées en été : le maïs et la betterave.

Le colza est conduit en sec mais il est classé parmi les cultures irriguées au printemps car une partie de son cycle (floraison-début de maturation) coïncide avec cette période.

Il existe 2 types de betterave : la betterave à sucre et la betterave éthanol, mais du point de vue technique, ils représentent une seule et même culture. Dans le modèle, la différence ne se fera qu'au niveau des prix : c'est lorsqu'il y a un surplus de production dépassant le quota défini pour la betterave

à sucre que l'excédent de cette dernière sera destiné à la transformation en éthanol. Cette production fait l'objet d'un contrat pluriannuel. La production d'éthanol n'est pas soumise à un quota et sert de variable d'ajustement pour le quota destiné à la production de sucre.

On distingue également deux types de blé dur et d'orge de brasserie ; le blé dur (BDh) et l'orge de brasserie (Orgeb) rémunérés au prix le plus élevé et peuvent être soumis à des contrats annuels (mais pas pluriannuels) qui limitent la production à un certain quota, et le blé dur (Bd0) et l'orge de brasserie (OrgeB0) qui ne se distinguent des deux premiers types que par le prix de vente. En effet, quand la production en BDh ou en Orgeb dépasse le volume maximal défini par le contrat, ces deux cultures seront valorisées mais à un prix plus bas (voir Annexe 1, tableau 5).

Pour le blé tendre d'hiver, on distingue deux catégories d'activités : le blé sur tête d'assolement (BTh) est un blé cultivé derrière une tête d'assolement (pois, colza, maïs ou betterave), et le blé de blé (BtB) qui est implanté derrière une céréale, la différence entre ces deux activités s'observe aussi au niveau des rendements, ces derniers calculés par le modèle du bilan hydrique correspondent à ceux d'un blé sur tête d'assolement, les rendements pour un blé de blé diminuent de 5 voire 10 q/ha, le reste de données (prix, charges) est supposé identique entre ces deux activités.

L'exploitation moyenne de type GC-betterave dispose de trois types de sols dont la RU<sup>2</sup> est de 100 mm/m pour chaque type, et qui se différencient selon leurs profondeurs :

- sols superficiels dont la profondeur est inférieure ou égale à 50 cm (RU= 50 mm) ;
- sols moyens : la profondeur est située autour de 70 cm (RU= 70 mm) ;
- sols profonds avec une profondeur dépassant le 1,1m (RU= 110 mm).

Les superficies des trois catégories de sols pour ce type d'exploitation ont été obtenues à partir de la répartition de la superficie totale en pourcentage fournie par l'INRA au niveau cantonal : les sols superficiels représentent environ 10% de la SAU totale, les sols moyens y occupent 55% et les sols profonds sont les plus dominants avec 35 % de la SAU, ce qui correspond respectivement pour notre exploitation à 10, 55 et 35 ha.

L'exploitation étudiée est caractérisée aussi par un volume d'eau de référence attribué de 110000 m<sup>3</sup> dont la distribution est assurée par un équipement dont le débit d'eau prélevable en m<sup>3</sup> par heure peut aller jusqu'à 110 (Morardet et Hanot, 2000).

Ce volume de référence a été réduit à 71 500 m<sup>3</sup> en le multipliant par un coefficient de nappe de 0,65 qui correspond à celui de l'année N-1 (source : DDAF Eure et Loir, 2011) en faisant l'hypothèse que l'agriculteur tient compte de ce coefficient avant la fixation de la sole en mois d'août.

Pour ce qui concerne la main-d'œuvre, les informations disponibles n'étaient pas suffisantes pour la prendre en considération dans l'étude. Elle fera l'objet d'une hypothèse dans le chapitre qui suit.

---

<sup>2</sup> **La réserve utile** : est exprimée en millimètres et correspond à l'eau présente dans le sol et qui est utilisable par la plante.

# Chapitre IV. Modélisation bio-économique

## I. Choix du modèle

Un modèle constitue une représentation schématique d'un système concret. Il répond au problème soulevé par la théorie de la production (Boussard, 1970), de l'allocation des ressources rares en vue de l'optimisation d'une fonction de préférence.

Un modèle peut être défini entre autres par la relation entre les variables endogènes (de sortie) et exogènes (d'entrée) : soit de type déterministe, soit de type stochastique. Dans notre cas, les exploitants agricoles évoluent en univers incertain, le risque principal considéré ici étant lié aux variations climatiques, nous avons donc besoin d'un modèle qui en plus de calculer la combinaison de productions qui maximise la marge brute de l'exploitation tout en tenant compte d'un ensemble de contraintes, il va prendre en compte l'aléa climatique, c'est pourquoi donc notre choix s'est porté sur le **modèle stochastique discret** (Rae, 1971 ; Allen, 2003 ; Bercu et Chafai, 2007) qui nous semble correspondre de façon assez pertinente aux objectifs de notre étude.

Dans un premier temps, nous essayerons de reproduire le comportement actuel de l'agriculteur à l'aide d'une programmation mathématique positive (descriptive) ensuite on simulera différents scénarios de politiques de gestion de l'eau afin de mesurer leurs impacts sur les choix pratiques mais aussi sur les résultats économiques et ceux en rapport avec la consommation en eau.

L'assolement calculé par le modèle représente la meilleure décision de production que puissent prendre a priori les agriculteurs compte tenu de leur perception des aléas et des contraintes auxquelles ils sont soumis.

## II. L'acquisition de données préalable à la construction du modèle

- Pour la construction du modèle, on s'est appuyé principalement sur les données provenant des déclarations d'assolement des agriculteurs recueillies lors des enquêtes -réalisées en 2006 par Brunel- et des comités techniques effectués en 2011, où ils précisent les principales cultures pratiquées et les différentes rotations.
- Nous avons également collecté des fichiers et des documents d'études antérieures qui nous ont servi comme support d'analyse comme le rapport de Morardet et Hanot (2000) ainsi que le mémoire de Buisson (2010) qui nous ont été utiles notamment dans la classification des sols.
- Le volume d'eau de référence (110 000 m<sup>3</sup>) attribué à l'exploitation-type retenue est issu de l'analyse statistique des bases de données « Eau » des départements Eure-et-Loir et du Loiret effectuée par Brunel en 2007.
- Pour les cultures sélectionnées pour notre modèle, les niveaux de rendements et les quantités d'eau nécessaires pour avoir ces rendements ont été calculés à l'aide d'un modèle de bilan hydrique « Pilote » à partir des données climatiques spatialisées, des données de sols et des paramètres des plantes. Ces données utilisées dans Pilote proviennent de :
  - paramètres plantes et paramètres sols: ces données sont issues essentiellement de la bibliographie (Arvalis) et des études antérieures.
  - climat : les informations relatives aux températures, pluies et au rayonnement global sont des données SAFRAN produites par Météo-France (Centre National de Recherches Météorologiques, CNRM). Ce sont des données horaires couvrant la France à une résolution de 8 km sur une projection Lambert-II étendue.
- Les débits d'irrigation ont été calculés à partir des doses apportées à chaque tour, pour chaque culture et sur les différents types de sols, ceci en divisant la dose par la durée du tour (10 jours)

et par le nombre d'heure d'irrigation à chaque tour (24h), donc le débit ( $m^3/h/ha$ )= dose ( $m^3/tour$ )/10 jrs/24h.

- Les prix de vente des produits agricoles ont été obtenus à partir de l'indice IPPAP (Indice des Prix des Produits Agricoles à la Production) publié sur le site de l'INSEE.
- Quant au reste des données, un déplacement sur le terrain a été effectué, où nous avons collecté les données relatives aux charges, primes, et coefficients de réduction, auprès des conseillers de la chambre d'agriculture du Loiret et des responsables de la DRAAF et du service ROSACE ; ce dernier rassemble des données technico-économiques, à l'échelle de la région Centre, par type d'exploitations.

### III. Hypothèse de modélisation

Avant de commencer la modélisation, nous avons émis quelques hypothèses en raison du manque de certaines données et/ou de l'absence de l'information complète.

- *Hypothèse 1*

Nous faisons l'hypothèse que la main-d'œuvre ne constitue pas une contrainte très forte dans ces exploitations suite au recours grandissant à la mécanisation qui fait abstraction du travail conventionnel d'un côté et d'un autre côté, l'information concernant cette ressource (périodicité) n'est pas entièrement disponible.

- *Hypothèse 2*

Nous faisons l'hypothèse qu'à court terme les structures de production sont supposées constantes (pas de nouveaux investissements).

- *Hypothèse 3*

Dans cette application, on suppose que toutes les surfaces de terres au niveau de l'exploitation étudiée sont irrigables.

### IV. Présentation du modèle bio-physique « Pilote »

Comme il a été souligné plus haut, le modèle de culture retenu dans notre étude est Pilote, c'est un programme développé à l'IRSTEA (ex. Cemagref) (González Camacho et al., 2008 ; Mailhol J.C. et al., 1996). C'est un modèle de bilan hydrique qui fournit une prévision du rendement et une estimation de la consommation en eau d'irrigation nécessaire pour atteindre ce rendement, pour une culture donnée et sur une période de simulation déterminée, en fonction de différents paramètres :

- paramètres de la culture (densité de semis,  $KC^3$ , évolution du LAI<sup>4</sup>...);
- paramètres du sol (PFP<sup>5</sup>, CC<sup>6</sup>, profondeur...);
- conduite de l'irrigation (selon un calendrier, en fonction de l'épuisement de la réserve utile (RU)...);
- itinéraire technique (date de semis, de récolte, période d'irrigation...).

Ce modèle effectue des calculs du bilan hydrique au pas de temps journalier pour les différentes cultures et est calé sur les espèces et les références expérimentales locales des différents instituts (ITB, Arvalis-Institut de végétal) et chambres d'agriculture et sur les travaux effectués en 2009.

---

<sup>3</sup> Coefficient cultural : fonction de la culture et de son stade végétatif, il caractérise la croissance de la plante au cours de son cycle végétatif

<sup>4</sup> Leaf Area Index : indice de la surface foliaire, correspond au ratio de la surface foliaire totale supérieure de la végétation divisée par la surface de la terre sur laquelle cette végétation se développe.

<sup>5</sup> Point de Flétrissement Permanent : correspond à l'humidité du sol à partir de laquelle la plante ne peut plus prélever d'eau, et flétrit, puis meurt si ce taux d'humidité perdure.

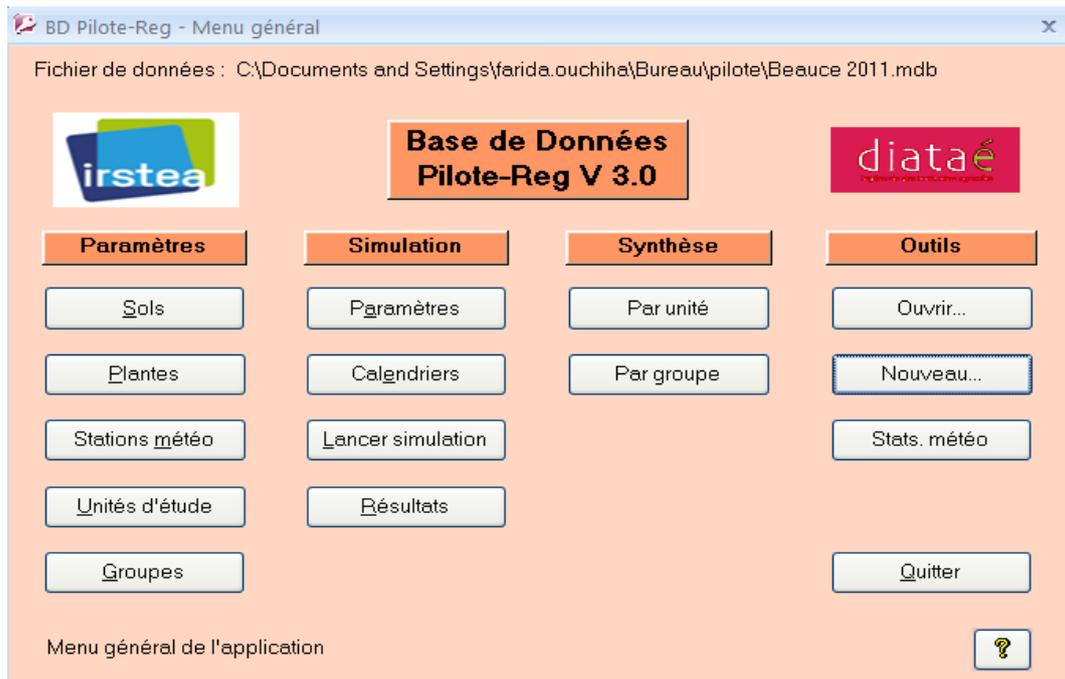
<sup>6</sup> Capacité au champ : c'est la capacité de rétention maximale en eau du sol.

La dernière version de pilote (Pilote-Reg) développée par le bureau d'étude DIATAE permet de réaliser rapidement plusieurs simulations sur un territoire (d'où le Reg pour "Régional").

## 1. Données d'entrée du modèle

Pour la construction du modèle, il est nécessaire d'introduire certains paramètres qui caractérisent le site d'étude, le climat, les cultures et les sols ; ces données sont organisées dans 4 fichiers : sols, plantes, stations météo et unités d'étude (figure 9.)

**Figure 9. Interface de pilote.**



### a. Fichier sol

Pour chaque type de sol, nous avons défini ses caractéristiques : la texture, la capacité au champ (CC), la profondeur, le point de flétrissement (PFP), la réserve utile (RU) ainsi que certaines constantes comme la constante K d'évaporation etc.

### b. Fichier plante

8 cultures ont été introduites : blé tendre d'hiver, blé dur d'hiver, orge d'hiver, orge de brasserie, pois protéagineux, colza, maïs et betterave. Chaque culture est caractérisée dans le fichier par : la somme des températures nécessaires pour arriver aux différents stades de son développement, les paramètres du LAI, la profondeur d'enracinement, l'humidité, l'indice de récolte...

A chaque culture, on associe par la suite (dans paramètres) les différents types de sol et les données météo des différentes stations, sa date de semis ainsi qu'un mode de conduite de l'irrigation : en sec, à l'ETM<sup>7</sup> ou en suivant un calendrier d'irrigation où on détermine les différentes doses apportées en fonction des besoins.

<sup>7</sup> Evapotranspiration maximale

### **c. Fichier climatique**

Le fichier climatique est composé de données journalières moyennes d'une série calculées sur 18 années (1990-2007) comprenant les températures moyennes, l'ETP<sup>8</sup> et le rayonnement global.

Les données de plusieurs stations climatiques peuvent être intégrées dans Pilote avec à l'appui une carte de localisation de la station considérée. Dans ce présent travail, les données météo sont issues de 5 stations différentes correspondant aux unités d'études élaborées.

### **d. Fichier unité d'étude : Intégration de l'information spatiale dans Pilote**

C'est à ce niveau que les unités d'études sont définies qui correspondent à des mailles de 8 km sur 8 caractérisées par des données météo spatialisées, 3 types de sols et 8 cultures, ces unités sont obtenues ainsi :

#### ➤ *Classification des mailles (annexe 5) :*

5 unités d'étude sont distinguées, elles correspondent aux classes de mailles (ou regroupements de classes) (figure 10) obtenues à partir d'une ACP effectuée sur 237 mailles (de 8km sur 8) décrites par 16 variables météo : moyenne, écart-type, valeur quinquennale et décennale, du déficit P-ETP<sup>9</sup> sur la période d'irrigation de printemps (10 avril jusqu'au 20 juin) et d'été (10 juin jusqu'au 25 août), et sur la période critique où les besoins en eau d'irrigation sont les plus élevés (printemps : 25 avril jusqu'au 01 juin ; été : 01 juillet jusqu'au 10 août) pour deux cultures de référence (le blé pour l'irrigation de printemps et le maïs pour l'irrigation d'été).

Après une ACP qui permet de transformer les variables quantitatives en variables non corrélées et une classification hiérarchique ascendante qui divise l'ensemble des exploitations en groupe homogènes nous avons abouti à 7 classes (figure 10) caractérisées par :

- classe 1 : zone la plus sèche à la fois en été et au printemps, mais moins variable que la moyenne ;
- classe 2 : déficits de printemps élevés (mais moins que classe 1), moins variable en été ;
- classe 3 : plus humide au printemps et en été, et plus variable que la moyenne ;
- classe 4 : plus humide et moins variable au printemps, plus humide et plus variable en été ;
- classe 5 : plus humide et moins variables au printemps et en été sur l'ensemble de la période d'irrigation ;
- classe 6 : plus sec (surtout sur la période critique) au printemps et en été et plus variables ;
- classe 7 : plus humide et plus variable au printemps, déficit décennal en été sur la période critique plus élevé.

- **Regroupement de classes possibles** : d'après l'arbre de classification les classes 3 et 4 peuvent être regroupées pour donner l'unité numéro 3, et les classes 5 et 7 en unité n°4, la classe 6 devient l'unité numéro 5.

- Au final, on aura 5 unités (zones) et pour chaque unité on prend la maille la plus représentative (celle qui a une distance par rapport à la moyenne de la classe, la plus faible).

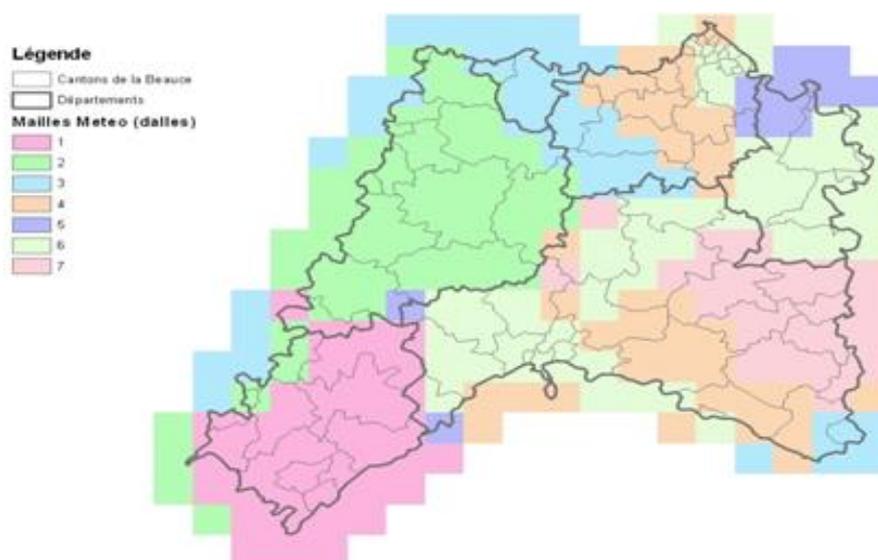
- A chaque unité sont associées des données météo correspondant à celle de la maille choisie et une station météo la plus proche de la maille en question, ainsi que les trois types de sols et l'ensemble des cultures définies.

---

<sup>8</sup> Evapotranspiration potentielle

<sup>9</sup> Déficit hydrique : pluies moins ETP

**Figure 10. Cartographie des classes de mailles**



- Par manque de temps, la modélisation s'est faite sur une seule zone, nous avons choisi de travailler sur l'unité numéro 5 qui correspond à la zone où sont localisées principalement les exploitations betteravières, elle se distingue des autres par un climat à la fois relativement plus sec au printemps et en été et plus variables. Cette unité est représentée par la station météo de Gironville.

## **2. Simulation**

A partir des données spatialisées, du fichier climatique, des données sur les sols, des données sur les paramètres plante, le modèle de culture Pilote permet d'estimer pour les cultures choisies, pour chaque type de sol, pour chaque année et pour chaque unité spatiale (maille) : les rendements, selon une stratégie d'irrigation définie, et les irrigations nécessaires pour atteindre ces rendements.

### ***a. Stratégies d'irrigation***

Globalement 5 stratégies d'irrigations sont choisies (sauf pour le colza qui est conduit en sec) et qui diffèrent en fonction des cultures et des types de sols (Tableau 1). Ces stratégies sont élaborées en s'appuyant sur les ateliers participatifs organisés en 2009.

**Tableau 1.** Stratégies appliquées par culture et par type de sols selon les différents états climatiques avec les doses associées

Cultures	Types de sols	Types de saisons	Doses				
			D0	D1	D2	D3	D4
Blé tendre	Superficiels (Dose: 30 mm)	Sèche	0	1 tour	2 tours	3 tours	4 tours
		Moyenne	0	1 tour	2 tours	3 tours	
		Humide	0	1 tour	2 tours		
	Moyens (35 mm)	Sèche	0	1 tour	2 tours	3 tours	
		Moyenne	0	1 tour	2 tours		
		Humide	0	1 tour			
	Profonds (40 mm)	Sèche	0	1 tour	2 tours		
		Moyenne	0	1 tour			
		Humide	0	1 tour			
Blé dur	Superficiels (30 mm)	Sèche	0	1 tour	2 tours	3 tours	4 tours
		Moyenne	0	1 tour	2 tours	3 tours	
		Humide	0	1 tour	2 tours		
	Moyens (35 mm)	Sèche	0	1 tour	2 tours	3 tours	
		Moyenne	0	1 tour	2 tours		
		Humide	0	1 tour			
	Profonds (40 mm)	Sèche	0	1 tour	2 tours	3 tours	
		Moyenne	0	1 tour	2 tours		
		Humide	0	1 tour			
Orge d'hiver	Superficiels (30 mm)	Sèche	0	1 tour	2 tours	3 tours	4 tours
		Moyenne	0	1 tour	2 tours	3 tours	
		Humide	0	1 tour	2 tours		
	Moyens (35 mm)	Sèche	0	1 tour	2 tours	3 tours	
		Moyenne	0	1 tour	2 tours		
		Humide	0	1 tour			
	Profonds (40 mm)	Sèche	0	1 tour	2 tours		
		Moyenne	0	1 tour			
		Humide	0	1 tour			
Orge de brasserie	Superficiels (30 mm)	Sèche	0	1 tour	2 tours	3 tours	
		Moyenne	0	1 tour	2 tours	3 tours	
		Humide	0	1 tour	2 tours	3 tours	

	Moyens (35 mm)	Sèche	0	1 tour	2 tours	3 tours	
		Moyenne	0	1 tour	2 tours		
		Humide	0	1 tour	2 tours		
	Profonds (40 mm)	Sèche	0	1 tour	2 tours		
		Moyenne	0	1 tour			
		Humide	0	1 tour			
Pois protéagineux	Superficiels (30 mm)	Sèche	0	1 tour	2 tours	3 tours	
		Moyenne	0	1 tour	2 tours		
		Humide	0	1 tour			
	Moyens (30 mm)	Sèche	0	1 tour	2 tours	3 tours	
		Moyenne	0	1 tour	2 tours		
		Humide	0	1 tour			
	Profonds (30 mm)	Sèche	0	1 tour	2 tours	3 tours	
		Moyenne	0	1 tour	2 tours		
		Humide	0	1 tour			
Betterave	Superficiels (30 mm)	Sèche	0	4 tours	5 tours	6 tours	7 tours
		Moyenne	0	2 tours	3 tours	4 tours	5 tours
		Humide	0	1 tour	2 tours	3 tours	
	Moyens (30 mm)	Sèche	0	4 tours	5 tours	6 tours	
		Moyenne	0	2 tours	3 tours	4 tours	
		Humide	0	1 tour	2 tours		
	Profonds (35 mm)	Sèche	0	3 tours	4 tours	5 tours	
		Moyenne	0	1 tour	2 tours	3 tours	
		Humide	0	1 tour			
Maïs	Superficiels (30 mm)	Sèche	0	4 tours	5 tours	6 tours	7 tours
		Moyenne	0	2 à 3 tours	3 à 4 tours	4 à 5 tours	
		Humide	0	2 tours	3 tours		
	Moyens (30 mm)	Sèche	0	3 tours	4 tours	5 tours	6 tours
		Moyenne	0	1 à 2 tours	2 à 3 tours	4 tours	5 tours
		Humide	0	1 tour	2 tours		
	Profonds (35 mm)	Sèche	0	3 tours	3 tours	4 tours	
		Moyenne	0	2 à 3 tours	2 à 3 tours		
		Humide	0	1 tour			

Source : Elaboré par Brunel à partir des ateliers participatifs de 2009.

## ***b. Résultats des simulations***

Les résultats de la simulation concernent :

- le bilan hydrique : qui inclut les précipitations, l'évapotranspiration, l'évaporation du sol, le drainage et l'irrigation.
- le rendement : il dépend de la biomasse totale cumulée au stade de maturité physiologique et de l'indice de récolte, il est calculé pour les 18 années selon les différentes stratégies. Deux types de rendements sont distingués : le rendement sec et le rendement humide.
- le développement de la surface foliaire par unité de temps : exprimé par le LAI.
- les dates de début et de fin de la phase critique (besoins de pointe).

Les principales données utilisées dans Pilote sont rapportées en annexe 1.

## **V. Présentation du modèle économique écrit sous « GAMS »**

GAMS est un logiciel qui permet de construire et de résoudre des modèles de programmation mathématique.

Les modèles ainsi créés seront soumis aux différents solveurs qui y sont inclus et qui permettent de résoudre des modèles de programmation linéaire, non linéaire ou mixte.

Pour cette étude, nous avons utilisé une approche de programmation linéaire sur le modèle de type stochastique, cette dernière est considérée par Boussard et Daudin (1988) comme un instrument particulièrement bien adapté aux problèmes qui se posent dans l'activité agricole.

Cet outil mathématique permet la résolution de problèmes dans lesquels une fonction objectif ou d'utilité doit être optimisée (maximisée ou minimisée) sous un certain nombre de contraintes. En pratique, ceci correspond à la recherche d'une combinaison optimale d'activités pour un ensemble de conditions technico-économiques données.

### **1. Formulation mathématique du modèle**

#### ***a. Fonction objectif***

Le modèle créé permet d'obtenir la combinaison optimale entre différentes activités soumises à diverses contraintes concourant à la réalisation d'un objectif donné (Boussard, 1987).

Il cherche à maximiser le revenu en tenant compte du risque climatique (aléas climatique).

La structure générale du modèle choisi se présente comme suit :

Optimiser une fonction objectif :

$$\text{Max} \quad Z = \sum_k P_k * Z_k$$

$$\text{Avec} \quad Z_k = \sum_i MB_{i, k} * X_i$$

$$\text{Sous les contraintes} \quad \sum_i a_{ij} * X_i \leq b_j$$

$$\text{Avec} \quad X_i \geq 0$$

Avec :

*k* : Etat de nature

*Z* : Fonction objectif à optimiser dans ce cas : revenu espéré.

$Z_k$  : Revenu total net par état de nature (par type d'année climatique).

$MB_{i,k}$  : Marge brute générée par chaque activité  $i$  et pour chaque état de nature  $k$ .

$a_{ij}$  : Matrice des coefficients techniques correspondant aux besoins de chaque activité  $i$  en facteurs de production  $j$ .

$b_j$  : Disponibilités en facteurs de production  $j$  (ressources).

$X_i$  : Surface par activité  $i$  (variable endogène).

$P_k$  : Probabilité d'apparition de chaque de nature.

### ❖ Liste des activités

Une activité est une production associée à un itinéraire technique, à un type de sol etc., les activités se distinguent par leur contribution à la fonction objectif (marge brute unitaire) et leur consommation en facteurs de production (Morardet et Hanot, 2000).

Dans notre cas, les activités pratiquées par l'agriculteur sont définies dans le modèle par rapport à une culture donnée (cp : ou ce), à un type de sol (S), et à une dose d'irrigation (d). Nous avons retenu pour notre étude 8 cultures principales classées en deux groupes distincts : le groupe des cultures irriguées au printemps et le groupe des cultures irriguées en été.

3 types de sols et 5 doses d'irrigation ont été définis aussi.

Dans GAMS, une activité est définie par les différentes combinaisons entre les sets du modèle (culture, type de sol, dose d'irrigation).

Le tableau suivant représente les différentes cultures, les types de sols et les doses d'irrigation considérés dans ce présent travail et les indices qui leurs sont associés.

**Tableau 2. Présentation des éléments définissant des activités et les indices utilisés dans GAMS**

<b>Éléments</b>	<b>Détails</b>		<b>Code en GAMS</b>
Cultures irriguées au printemps (cip)	Blé tendre d'hiver sur tête d'assolement		<b>BTh</b>
	Blé dur d'hiver rémunéré au prix le plus élevé		<b>BDh</b>
	Orge d'hiver		<b>Orgeh</b>
	Orge de brasserie rémunéré au prix le plus élevé		<b>Orgeb</b>
	Pois protéagineux		<b>POISp</b>
	Colza		<b>col</b>
	Blé de blé		<b>BtB</b>
	Blé dur d'hiver rémunéré à un prix plus bas		<b>Bd0</b>
	Orge de brasserie rémunéré à un prix plus bas		<b>OrgeB0</b>
Cultures irriguées en été (cie)	Maïs		<b>maïs</b>
	Betterave	Betterave à sucre	<b>Bsucre</b>
		Betterave éthanol	<b>Beth</b>
Sols	Sol superficiel		<b>S1</b>
	Sol moyen		<b>S2</b>
	Sol profond		<b>S3</b>
Doses d'irrigation	Différentes en fonction des cultures et des types de sol (voir tableau 1.).		<b>D0</b>
			<b>D1</b>
			<b>D2</b>
			<b>D3</b>
			<b>D4</b>

**b. Prise en compte du risque**

Etant donné que la production agricole est une activité généralement risquée où les agriculteurs se retrouvent souvent confrontés à une variabilité au niveau des prix, des rendements (due le plus souvent à la variabilité climatique) et à des risques au niveau de la disponibilité en ressources qui rend leurs revenus instables d'une année à l'autre (Hazell P. B.R., Norton R. D., 1986), la prise en compte de ces différentes formes de risque dans un modèle d'exploitation s'avère donc indispensable.

La prise en compte du risque dans les modèles de comportement économique des agriculteurs est souvent considérée comme une condition nécessaire de leur validité. Un modèle descriptif du comportement du producteur agricole qui ne tient pas compte du risque, conduit à un écart important entre les solutions du modèle et les choix observés (Blanco Fonseca et al., 2009).

L'introduction du risque a donc pour objectif d'avoir un modèle plus réaliste capable de reproduire ou au moins de se rapprocher de la réalité. Elle assure donc un calibrage approximatif du modèle.

Il existe deux sources de risque dans notre étude : d'une part, le risque agronomique, représenté par la variabilité des rendements due au fait de la variabilité climatique, et d'autre part, le risque économique, représenté par les variations des prix des produits. A priori, on ne s'intéressera qu'au risque engendré par la variabilité du climat d'où notre objectif qui sera de maximiser le revenu annuel espéré en tenant compte des différentes chroniques climatiques.

### ❖ Variabilité climatique

L'aléa climatique est représenté ici par 3 états climatiques pour chaque période d'irrigation (humide, moyen, et sec). A chaque état et à chaque période, une probabilité d'occurrence a été attribuée.

Pour définir les probabilités introduites dans le modèle, deux cultures de référence ont été choisies : le blé tendre pour l'irrigation du printemps et le maïs pour l'irrigation d'été. Ensuite les besoins en eau de chaque culture ont été calculés sur une série climatique de 18 années, et par la suite ces années ont été classées par besoins en eau croissants. Les années à printemps humide ou à été humide (respectivement à printemps ou été secs) ont été définies comme les quatre années où les besoins en eau du blé et du maïs sont les plus faibles (respectivement les plus élevés). Les années qui restent correspondent donc aux années à printemps moyen et à été moyen.

Elles sont classées comme suit :

- printemps sec : 1992, 1996, 2003 et 2006 ;
- printemps moyen : 1990, 1991, 1995, 1997, 1999, 2001, 2002, 2004, 2005 et 2007 ;
- printemps humide : 1993, 1994, 1998, 2000 ;
- été sec : 1990, 1995, 1996 et 2006 ;
- été moyen : 1991, 1992, 1993, 1998, 1999, 2000, 2002, 2003, 2004, 2005 ;
- été humide : 1994, 1997, 2001, 2007.

Les probabilités d'apparition de chaque état climatique se résument ainsi :

- un printemps sec est observé 4 années sur 18, c'est-à-dire une probabilité de 0,22 ;
- même raisonnement a été adopté pour le printemps humide (0,22) ;
- un printemps moyen est donc un printemps qui est observé avec une probabilité de 0,55 c'est-à-dire 10 années sur 18.

Nous aurons donc neuf combinaisons climatiques possibles : ps\*es, ps\*em, ps\*eh, pm\*es, pm\*em, pm\*eh, ph\*es, ph\*em, ph\*eh, les probabilités affectées à chaque état de nature sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau 3. Probabilités d'apparition des différents états climatiques**

		PRINTEMPS		
		Humide (ph): p=0,22	Moyen (pm) : p=0,55	Sec (ps): p=0,22
Été	Humide (eh) : p=0,22	ph*eh: p=0,048	pm*eh: p=0,12	ps*eh: p=0,048
	Moyen (em): p=0,55	ph*em: p=0,12	pm*em: p=0,3	ps*em: p=0,12
	Sec (es): p=0,22	ph*es: p=0,04	pm*es: p=0,12	ps*es: p=0,048

### c. Variables de décision

Pour maximiser sa fonction objectif, l'agriculteur a pratiquement deux variables de décision : l'allocation de sa surface de terre disponible et de son volume d'eau entre les cultures : il va décider dans un premier temps de la surface qu'il va allouer aux différentes cultures et dans un deuxième temps il va décider de la surface qu'il va irriguer pour les cultures retenues dans l'assolement global et la dose d'eau appliquée.

Au niveau du modèle, trois périodes de décisions sont prises en compte : automne, printemps, été.

- **En automne** : l'agriculteur choisit l'assolement général : il choisit les cultures qu'il va irriguer au printemps et les cultures qu'il va irriguer en été sur la gamme des cultures qui lui sont proposées. L'assolement choisi à l'automne ne peut plus être modifié par la suite, sauf par abandon d'une activité.

- **Au printemps** : une fois que l'assolement est choisi, l'agriculteur passe à la deuxième période de décision où il choisit au printemps les doses d'irrigation pour les cultures irriguées au printemps préalablement retenues.
  - **En été** : choix des doses d'eau sur les cultures irriguées en été.
- Les apports d'eau (doses) sont variables selon les cultures, le type de sol, le matériel etc. mais le choix de la dose dépendra en grande partie du climat de la période.

#### **d. Contraintes**

Les contraintes traduisent la concurrence qui existe entre plusieurs activités ou variables pour l'emploi d'une ressource limitée, ainsi que l'influence qu'exerce une mesure économique ou politique exogène sur la combinaison productive (Carpy-Goulard, 2001).

Les contraintes dans notre étude ont été identifiées lors des enquêtes antérieures en exploitations, et après discussion avec des spécialistes dans le domaine, elles représentent les limites auxquelles sont soumises les exploitations actuellement.

Les contraintes prises en compte dans le modèle sont de deux ordres :

- internes à l'exploitation : ce sont surtout des contraintes techniques comme : la surface totale disponible, les catégories de sol, la surface maximale des cultures devant respecter des règles de rotation et le débit maximal d'irrigation assuré par le matériel.
- externes à l'exploitation : d'ordre politique comme le volume d'eau attribué à chaque exploitation qui correspond à une mesure politique de gestion de l'eau et les contraintes d'ordre économique comme les quotas de production (betteraves).

#### **A. Contraintes internes à l'exploitation :**

- *La terre*

La somme des surfaces occupées par les différentes cultures (irriguées au printemps et irriguées en été) doit être inférieure ou égale à la SAU totale de l'exploitation (terre disponible).

Dans notre cas, nous avons spécifié la disponibilité de la terre en fonction des types de sol, d'où la contrainte terre qui s'écrit pour chaque type de sol comme suit :

$$\text{Terre}_s : \sum_{cp, ce} (XP_{cp, s} + XE_{ce, s}) \leq TD_s$$

Où,

**Terre<sub>s</sub>** : Equation de la contrainte terre par type de sol.

**XP<sub>cp,s</sub>** : représente la surface totale allouée à la culture irriguée au printemps 'cp' définie dans la première période de décision (automne) sur le type de sol 's'.

**XE<sub>ce,s</sub>** : représente la surface totale allouée à la culture irriguée en été 'ce' définie dans la première période de décision (automne) sur le type de sol 's'.

**TD<sub>s</sub>**: est la surface de terre disponible de type de sol 's': à chacun des 3 types de sols existants (sols profonds, moyens et superficiels) est affectée une surface de terre disponible dont la somme des trois donne la surface totale de terre disponible au niveau de notre exploitation.

- *Les rotations*

La rotation signifie la succession des cultures dans le temps sur la même parcelle.

Concrètement et pour des raisons agronomiques, le retour de certaines cultures est limité dans le temps : le pois revient au plus tous les 8 ans, les betteraves et le colza tous les 3 ans et le maïs tous les 2 ans. Pour les céréales à paille, on distingue deux catégories d'activités : les céréales sur tête d'assolement dont la somme des superficies en blé tendre, blé dur, orge d'hiver et orge de brasserie est nécessairement inférieure ou égale à la somme des superficies en betterave, maïs, pois et colza, et le blé de blé qui peut être implanté derrière une céréale d'hiver.

Les contraintes de rotation temporelles sont transformées en contraintes spatiales dans le modèle (limitation de la surface) en utilisant des coefficients correspondant au nombre d'apparition de ces cultures sur une période de temps. À titre d'exemple, le colza qui revient tous les trois ans (une année sur 3) portera le coefficient 0,33 qui est égale à 1/3. Ces contraintes sont écrites pour chaque type de sol.

L'équation générale de la rotation pour une culture irriguée au printemps est écrite de la manière suivante :

$$\text{Rotation } s : \quad XP'_{cp',s} \leq TD_s * \text{coeff}$$

Avec :

**XP**  $'_{cp',s}$  : représente la surface totale allouée à la culture irriguée au printemps 'cp' et soumise à la rotation et qui est définie dans la première période de décision (automne), sur le type de sol 's'.

**Coeff** : coefficient indiquant le nombre de fois où la culture spécifiée revient sur une période de temps.

#### **Exemple : Cas du colza**

$$\text{Rotcol } s: \quad XP'_{col',s} \leq TD_s * 0,33$$

Où,

**Rotcol**  $_s$  : représente l'équation de la rotation pour la culture du colza sur le type de sol 's'.

**XP**  $'_{col',s}$  : représente la surface totale allouée au colza qui est définie dans la première période de décision (automne), sur le type de sol 's'.

**0,33** : le nombre de fois où le colza revient dans le temps : une année sur trois dans ce cas.

Les autres contraintes de rotation sont écrites de la même manière (pois protéagineux, betterave, maïs) avec des coefficients différents en fonction de la culture.

- **Contrainte de débit d'équipement**

La somme des débits nécessaires pour fournir une dose donnée à une culture ne doit pas dépasser le débit maximal fourni par l'installation de l'équipement d'irrigation.

Une contrainte est écrite pour chaque période d'irrigation (printemps et été) et par état climatique. Il est faux de les mettre dans une même équation vue que la limite de débit peut être atteinte à chaque période d'irrigation séparément.

Ici on développe juste la contrainte de débit pour la période de printemps. Par la suite, il suffit de procéder de la même manière pour celle de l'été.

$$\text{dbp}_{tp} : \sum_{cp,s,d} (\text{debp}_{cp,s,d,tp} * XIP_{cp,s,d,tp}) \leq \text{deb}_{\max}$$

Avec:

**dbp<sub>tp</sub>** : Equation de la contrainte de débit au printemps pour le type de printemps 'tp'.

**debp<sub>cp,s,d,tp</sub>** : débit d'irrigation nécessaire pour la culture irriguée au printemps 'cp', sur le type de sol 's' avec la dose d'irrigation 'd' et pour le type de printemps 'tp'.

**debmax** : débit maximal d'irrigation permis par le matériel d'irrigation existant sur l'exploitation.

## B. Contraintes externes à l'exploitation (d'ordre économique et politique)

Parmi les contraintes qui peuvent s'ajouter aux contraintes agronomiques et techniques, il y a celles qui relèvent de la politique agricole (gel de terres, obligation de jachère, quotas d'eau...) et d'autres d'ordre économique relatives à la disponibilité des marchés et la capacité des filières à la transformation (ex : quotas de production).

### • Contrainte de volume d'eau

Le volume d'eau utilisé (produit des surfaces irriguées et des doses d'eau) doit être inférieur à la référence attribuée aux exploitations pondérée par le coefficient de réduction de celui-ci quel que soit l'état de la nature (c'est-à-dire la combinaison des types de printemps et d'été) comme l'indique l'équation suivante :

$$\text{Eau}_{tp,te} : \sum_{cp,s,d} (\text{dp}_{cp,s,d,tp} * XIP_{cp,s,d,tp}) + \sum_{ce,s,d} (\text{de}_{ce,s,d,te} * XIE_{ce,s,d,te}) \leq \text{ED} * (1 - \text{coefRed})$$

Où,

**Eau<sub>tp,te</sub>** : Equation de la contrainte de volume d'eau pour le type de printemps 'tp' et le type d'été 'te'.

**XIP<sub>cp,s,d,tp</sub>** : représente la surface de la culture irriguée au printemps 'cp' sur le type de sol 's', avec la dose 'd' et pour le type de printemps 'tp', définie dans la deuxième période de décision (printemps).

**XIE<sub>ce,s,d,te</sub>** : représente la surface de la culture irriguée en été 'ce' sur le type de sol 's', avec la dose 'd' et pour le type d'été 'te', définie dans la troisième période de décision (été).

**dp<sub>cp,s,d,tp</sub>** : Doses d'eau apportée à la culture irriguée au printemps 'cp', sur le type de sol 's' pour le type de printemps 'tp'.

**de<sub>ce,s,d,te</sub>** : Doses d'eau apportée à la culture irriguée en été 'ce', sur le type de sol 's' pour le type d'été 'te'.

**ED** : volume d'eau de référence attribuée à l'exploitation d'étude.

**coefRed** : coefficient de réduction du volume de référence décidé chaque année en fonction du niveau de la nappe, il est situé entre 0 et 1.

Une telle équation est écrite pour chaque combinaison de type de printemps et d'été (soit 9 équations au total).

- **Contraintes filières**

→ Quota betterave

Pour notre étude, des contraintes de commercialisation ont été identifiées. En effet, pour des raisons liées à la capacité de transformation des filières, certaines productions sont limitées à l'échelle régionale. C'est le cas de la betterave dont le volume de la production sur l'année est limité par un quota défini par un contrat pluriannuel, si ce quota est dépassé, le surplus de production sera destiné à la transformation en éthanol au lieu de la production de sucre et valorisé à un prix plus faible.

→ Quota blé dur et orge de brasserie

Ces productions ne sont pas contractualisées de manière pluriannuelle, mais un éventuel contrat annuel définit des maximales de production, tout comme la betterave, si le quota est dépassé le surplus de la production sera rémunéré à un prix plus bas.

Ces contraintes s'écrivent de la manière suivante (ex. Betterave) avec une contrainte écrite pour chaque type de saison :

$$\text{Quotabett}_{te} : \sum_{s,d} (RDTe^{Bsucre',s,d,te} * XIE^{Bsucre',s,d,te}) \leq \max bett$$

Avec :

**Quotabett<sub>te</sub>** : Equation de la contrainte du volume maximal de production rémunéré au prix le plus élevé pour la betterave et pour le type d'été 'te'.

**RDTe<sup>'Bsucre',s,d,tp</sup>** : rendement de la betterave sur le type de sol 's', avec la dose d'irrigation 'd' et pour le type d'été 'te'

**Maxbett** : volume maximal de la production en betterave rémunéré au prix le plus élevé.

### C. Contraintes de liaisons (de transfert)

La dernière catégorie de contraintes correspond aux liaisons entre les choix d'assolement faits à l'automne et les choix de doses d'eau aux deux périodes d'irrigation (printemps et été). En effet, l'assolement choisi à l'automne ne peut plus être modifié par la suite, sauf par abandon d'une activité.

Une contrainte de liaison est écrite pour chaque culture, pour chaque type de sol et pour chaque type de printemps ou d'été. Dans ce qui suit l'équation concerne la période de printemps seulement, le même principe peut être adopté pour celle de l'été :

$$\text{LiaisonP}_{cp,s,tp} \quad XP_{cp,s} \geq \sum_d XIP_{cp,s,d,tp}$$

Avec:

**LiaisonP**  $cp,s,tp$  : Equation de la contrainte de liaison pour la période de printemps, pour la culture 'cp', sur le type de sol 's' et pour le type de printemps 'tp'.

## 2. Evaluation du modèle (calibration et validation)

En programmation mathématique, l'évaluation du modèle se fait le plus souvent en 2 étapes : la phase de calibrage et la phase de validation :

### a. Calibrage

Le calibrage consiste à ajuster les paramètres ou coefficients du modèle et à vérifier sa cohérence interne (les relations algébriques qui les constituent) de manière à reproduire la situation réelle observée (Boussard, 1987).

Il existe deux groupes de méthodes de calibrage: méthodes de calibrage approximatif (introduction des contraintes, du risque...) et les méthodes de calibrage exact en utilisant la PMP (Blanco Fonseca et al., 2009). Cette deuxième méthode rend le modèle très rigide et ne laisse pas une grande marge de souplesse, c'est pourquoi nous avons opté pour le calibrage approximatif.

Notre modèle tel qu'il est conçu est en partie calibré. En effet, après avoir introduit les différentes contraintes (techniques et économiques) et le risque notre modèle représente mieux la situation observée, il reste à vérifier la cohérence et la correspondance des résultats obtenus avec ce qui est observé dans la réalité.

### b. Validation

La validation consiste à confronter les résultats du modèle calibré à ceux réellement observés pour une ou des années de référence (Blanco Fonseca et al., 2009).

Pour valider le modèle calé, nous lancerons le modèle pour une année de base (scénario de référence S0) correspondant à l'année où aucun scénario ni politique de gestion n'a été simulé, ensuite nous comparerons les résultats de la simulation à ceux réellement observés et si le pourcentage de déviation absolue moyenne (PAD<sup>10</sup>) entre les deux résultats pour les données choisies pour la comparaison (variables de décisions :assolement, revenus , marges...) ne dépasse pas un intervalle raisonnable de fluctuation (25%), alors le modèle peut être considéré comme robuste et peut être validé et utilisé pour simuler les scénarios choisis.

Le seuil de 25% que nous avons retenu reste subjectif car dans la littérature il n'existe ni valeur de référence ni consensus sur la méthode statistique à adopter pour évaluer la qualité d'un modèle.

#### - Résultats du calage :

La variable utilisée pour la comparaison concerne l'assolement calculé par le modèle et l'assolement moyen donné par le RPG 2008, ce dernier est obtenu à partir des analyses statistiques et des calculs faits sur la base de données du RPG.

---

$$PAD^{10}(\%) = 100 * \frac{\sum_i (|x_i - x_{io}|)}{(\sum_i x_{io})} = \text{« Pourcentage Absolute deviation » : mesure les écarts entre les}$$

assolements simulés ( $X_i$ ) et observés ( $X_{io}$ ) pour les différentes simulations. Si le pourcentage de déviation absolue (PAD) est égal à zéro (0 %), alors le modèle est considéré comme calibré et peut être utilisé pour simuler les scénarios sélectionnés.

Le tableau 4 donne les résultats du modèle et les données du RPG, ainsi que la comparaison entre les deux

**Tableau 4. Comparaison de l'assolement réel moyen (données RPG 2008) et de l'assolement calculé par le modèle, pour une exploitation de type GC-Betterave (ha)**

	Résultats du modèle (Xi)	Données RPG 2008 (Xi <sub>0</sub> )	Xi <sub>0</sub> - Xi
SAU	100	100	0
<b>Céréales d'hiver</b>	50,03	50,65	0,62
blé tendre	34,27	36,65	2,38
blé dur	15,76	7,59	8,17
orge d'hiver	0	6,41	6,41
<b>Orge d brasserie</b>	17,12	19,23	2,11
<b>Proteagineux (pois)</b>	8,12	1,46	6,66
<b>Oleagineux (colza)</b>	0	3,86	3,86
<b>Maïs</b>	5,35	1,72	3,63
<b>Betterave</b>	19,38	23,09	3,71
$\sum  Xi\text{ obs- }Xi\text{ sim} $	20,58		
<b>PAD</b>	<b>20,58</b>		

**N.B.** Le calage s'est fait en comparant les cultures par groupe auxquels elles appartiennent ou par les filières qu'elles représentent, comme les céréales d'hiver dont l'écart pour le calcul du PAD ne s'est pas fait culture par culture mais sur l'ensemble des céréales à d'hiver.

Le PAD calculé donne l'écart entre l'assolement réel et l'assolement calculé par le modèle qui est égal à la somme des valeurs absolues des écarts pour chaque culture, rapportée à la SAU totale. Cet écart est plus important pour les cultures de blé dur et de pois (surestimées par le modèle) et d'orge d'hiver et de colza (non pris par le modèle).

L'explication de cette différence peut résider dans l'écriture de la fonction objectif du modèle où nous n'avons pas pris en compte l'aversion au risque de l'agriculteur du point de vue variabilité des prix, du climat etc. On peut imaginer qu'avec l'intégration de l'aversion au risque, le colza aurait été choisi (peut-être au détriment du pois), puisqu'il est cultivé en sec et permet de réduire le risque de manque d'eau, et les superficies en blé dur aurait été moins élevées vue que cette production subit une forte fluctuation des prix d'une année à l'autre.

## Chapitre V. Scénarios simulés

Une fois que le fonctionnement de notre exploitation type est modélisé et le modèle est calibré et validé, l'étape suivante de notre travail consiste à envisager des solutions possibles au problème de l'allocation et de la gestion de la ressource eau, en testant un ensemble de scénarios pour voir l'impact qu'ils pourraient avoir sur cette ressource (consommation d'eau), sur le plan de production ainsi que sur les résultats économiques des agriculteurs (revenus).

Dans ce chapitre, on présentera les différents scénarios à simuler ainsi que la manière de les introduire dans le modèle.

Deux scénarios ont été retenus et testés dans le présent travail :

**Scénario 1** : Variation de la redevance (augmentation de la part variable du tarif de l'eau), pour simplifier, on l'appellera 'scénario prix'.

**Scé**

**nario 2** : Variation du volume de référence ou 'scénario eau'.

### I. Scénario 1

En France, il existe de nombreux modes de tarification, les 3 les plus fréquents (en réseau collectif) sont (Gleyses, 1998) :

- le tarif forfaitaire fonction de la surface souscrite ;
- le tarif binôme fonction de la surface souscrite et du volume d'eau consommé ;
- le tarif binôme fonction du débit souscrit et du volume d'eau consommé.

Le système de tarification instauré au niveau de notre exploitation est supposé de type binôme fonction de la surface et du volume d'eau consommé, il est composé de deux parties : (i) une partie fixe à l'hectare indépendamment de la quantité d'eau utilisée, elle comprend les dépenses d'investissement et certaines dépenses de maintenance et de fonctionnement (assurances, abonnements EDF, une partie des travaux d'entretien et réparation ...), (ii) une partie variable qui correspond à la redevance proportionnelle au volume d'eau produit : il s'agit en premier lieu de la consommation d'électricité, mais aussi des dépenses de réparation des moteurs et pompes pour la part imputable à l'usure due au fonctionnement des installations, elle est fixée à 0,055 € par m<sup>3</sup> consommé.

La part fixe à l'hectare souscrit varie fortement selon que le réseau a des annuités d'emprunt ou pas, elle est située entre 100 et 130 € lorsque les réseaux n'ont plus de remboursement d'emprunts, contractés pour la création de leurs infrastructures (Cemagref, 2004). Dans cette étude, on fait l'hypothèse que les 'charges diverses' dans les charges opérationnelles introduites dans le modèle, correspondent à cette part fixe.

Dans ce scénario, on fera varier la part variable du tarif (la redevance) en multipliant ce prix par 2, 3... jusqu'à 10 fois le prix de base (1, 2..., 10\*0,05 €/m<sup>3</sup>). Cependant, aucune restriction du volume de référence n'a été effectuée, ce dernier est fixé à 71 500 m<sup>3</sup>.

Il est à noter que le prix de l'eau est supposé connu bien à l'avance, avant le choix des assolements.

Ce scénario a comme objectif de voir si les exploitations de ce type seraient sensibles à une éventuelle augmentation du prix de l'eau qui est fonction de la consommation et si c'est le cas, à quel niveau cette alternative serait-elle incitative et quels seraient ses impacts sur l'exploitation agricole (assolement, revenu, consommation en eau...).

Les différents niveaux de prix appliqués sont repris dans la partie résultats et discussion.

## **II. Scénario 2**

Cette deuxième mesure consiste à faire baisser le volume de référence dont dispose l'exploitation en multipliant le volume d'eau disponible au départ (71 500 m<sup>3</sup>) par des coefficients de nappe décroissants allant de 0,65 à 0,2, ceci pour faire face à des situations de changement au niveau du contexte climatique (et ou politique) avec des restrictions très élevées (0,2 réduisant le volume de 80%) qui correspondent à des situations de sécheresse extrême.

Dans la réalité, les décisions stratégiques des agriculteurs autant pour les cultures d'hiver que celles de printemps et d'été, sont prises vers le mois d'Août de l'année N-1 bien avant la connaissance du coefficient de nappe de l'année en cours. Le coefficient de nappe de l'année N n'est défini qu'en mars. Pour cela, nous avons donc fait l'hypothèse que les coefficients de nappe simulés seraient connus suffisamment tôt pour que les agriculteurs puissent en tenir compte.

Ce scénario a comme objectif de voir dans un premier temps quels seraient les changements au niveau du plan de production et des stratégies d'irrigations adoptées sous différents niveaux de la ressource et dans un deuxième temps d'étudier l'impact de ces changements sur la consommation et comment cela pourrait impacter le revenu de l'agriculteur.

Tout comme les prix, les différents coefficients de nappe appliqués sont repris dans la partie résultats et discussion.

D'autres scénarios ont été envisagés comme les MAE, les aides au désinvestissement et la mise en place des marchés de l'eau ; mais par manque de temps, ils n'ont pas été testés.

## **III. Introduction des scénarios dans le modèle**

Les deux scénarios choisis ont été introduits dans le modèle de la même façon : en ajoutant dans la liste des 'sets' un indice 'IT' qui fait des itérations soit du prix de l'eau soit le coefficient de nappe entre les différents niveaux choisis et le modèle va donner des résultats correspondant à chaque itération et à chaque scénario. Cependant, la combinaison des deux scénarios n'a pas été testée.



## Partie III. Résultats et discussion

### Chapitre I. Résultats des simulations par ‘Pilote’

Dans la première partie de la modélisation, nous avons utilisé un modèle de culture « Pilote » afin de calculer les rendements et les quantités d’eau à apporter en fonction de différents paramètres définis et des stratégies d’irrigation proposées.

Ces calculs ont été faits sur des données climatiques spatialisées d’une série de 18 années climatiques. Après avoir classé ces années en fonction du type de climat observé pendant les saisons printanières et estivales, nous avons abouti à trois types de printemps et trois types d’étés (Partie II, chapitre IV.V.1, paragraphe b).

Les résultats des simulations concernent principalement le bilan hydrique, le rendement, le développement de la surface foliaire par unité de temps etc. Les résultats auxquels nous nous sommes intéressés sont les rendements et les doses d’irrigation apportées, ces résultats sont donnés par culture, par type de sol, par type de saison et pour chaque stratégie définie.

Notre but dans la détermination des différentes stratégies (ou doses d’irrigation) est de donner la possibilité à l’agriculteur de pouvoir ajuster ces doses par la suite en fonction de la situation à laquelle il est confronté (année sèche, humide, volume de référence élevé, réduit...).

De manière générale, les résultats obtenus montrent une variabilité interannuelle des rendements en fonction des doses apportées et du type de climat et dans une deuxième mesure en fonction de la profondeur des sols.

Le détail des rendements et des doses obtenus par Pilote se trouve en Annexe 1 (tableaux 6 et 7).

## Chapitre II. Résultats du modèle économique

Les rendements calculés par Pilote et les doses d'eau apportées ont été introduits dans le modèle économique avec d'autres données d'entrée de type économiques comme les charges, les prix... (Annexe 1, tableau 5) ou relatives à l'exploitation (liste des cultures, disponibilités en facteurs de production, volumes contractualisés...).

Il est important de rappeler que le modèle économique écrit sous langage GAMS, est un modèle d'optimisation sous contraintes (disponibilité en facteurs de production, le respect des rotations et des quotas de production) visant à maximiser une fonction objective qui est assimilée dans notre étude à la marge brute totale moyenne.

A chaque solution optimale proposée par le modèle pour les différents scénarios simulés, nous pouvons observer et analyser les changements au niveau des assolements et des stratégies d'adaptation choisies dans les différents états climatiques ainsi que l'évolution du revenu de l'agriculteur et de la consommation en eau.

Comme il a été précisé dans la partie II, deux scénarios ont fait l'objet des simulations :

– *Scénario 1 : Augmentation du prix de l'eau*

10 niveaux de prix ont été testés en multipliant successivement le prix initial de l'eau (0.055 €/m<sup>3</sup>) par 2 puis 3... jusqu'à 10 fois le prix de base (Tableau 5);

**Tableau 5. Différents niveaux de prix de l'eau appliqués**

	S0=PE*1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Prix de l'eau (PE) en €/m <sup>3</sup>	0,055	0,11	0,165	0,22	0,275	0,33	0,385	0,44	0,495	0,55

– *Scénario 2 : Réduction du volume de référence*

En faisant varier le coefficient de nappe entre 0,65 (Coefficient de nappe au scénario de référence) et 0,2. Seulement 4 nouveaux coefficients sont retenus qui correspondent à des volumes de référence restreints induisant des changements significatifs au niveau des différentes variables analysées.

Les coefficients choisis ainsi que les volumes de référence résultants sont représentés dans le tableau suivant :

**Tableau 6. Les coefficients de nappe appliqués et les volumes de références réduits qui en résultent en m<sup>3</sup>**

Coefficients de nappe	S0=coef.	0,65	0,55	0,45	0,3	0,2
Volume de référence		71 500	60 500	49 500	33 000	22 000

L'effet de ces différents niveaux de prix de l'eau et du coefficient de nappe sur la consommation en eau au niveau de l'exploitation et aussi sur les autres variables telles que le revenu, le plan de production, les stratégies d'irrigation etc. est analysé en comparant à chaque fois les résultats obtenus avec ceux du scénario de référence.

Les principaux résultats obtenus sont présentés ci-après.

## I. Analyse du scénario de référence

Dans le scénario de référence, le coefficient de nappe est de 0.65, il correspond au coefficient appliqué pendant la campagne précédant l'année d'étude (2007) (Source : DDAF Eure-et-Loir, 2011), réduisant ainsi le volume de référence attribué à l'exploitation de 35% : passant de 110 000 m<sup>3</sup> à 71 500 m<sup>3</sup> pour la campagne d'irrigation de 2008. Pour ce qui est du prix de l'eau au départ, il est de 0,055 € le m<sup>3</sup>.

L'assolement observé cette année avant toute intervention, le revenu ainsi que la consommation en eau au niveau de l'exploitation sont décrits ci-dessous.

### 1. Assolement

L'assolement optimal choisi par le modèle dans le scénario de référence et qui correspond plus ou moins à celui observé sur le terrain, est représenté principalement par les céréales à paille : blé tendre, blé dur (les 2 catégories) et orge de brasserie, qui occupent plus de deux tiers (67%) de la SAU totale (Figure 11).

La répartition de la SAU entre les cultures se décide essentiellement par le choix des cultures les plus rentables tout en tenant compte des différentes contraintes, le choix des doses n'est pas un critère déterminant dans ce scénario vu que le volume d'eau disponible n'est pas contraignant.

La prédominance de la céréaliculture peut s'expliquer par la marge élevée que dégagent certaines de ces céréales comme le blé dur et l'orge de brasserie qui ont enregistré une forte augmentation des prix de vente pendant la campagne 2007 (source INSEE).

Le blé tendre derrière une céréale (BtB) représente la part de la SAU la plus élevée, ceci bien que les rendements et la marge de cette culture soient inférieurs à ceux d'un blé derrière une tête d'assolement (BTh) ou à ceux d'une orge d'hiver<sup>11</sup> qui n'ont pas été retenus, on peut justifier cela par le fait que cette activité n'est pas limitée par les contraintes de rotations comme celles qui limitent les autres céréales.

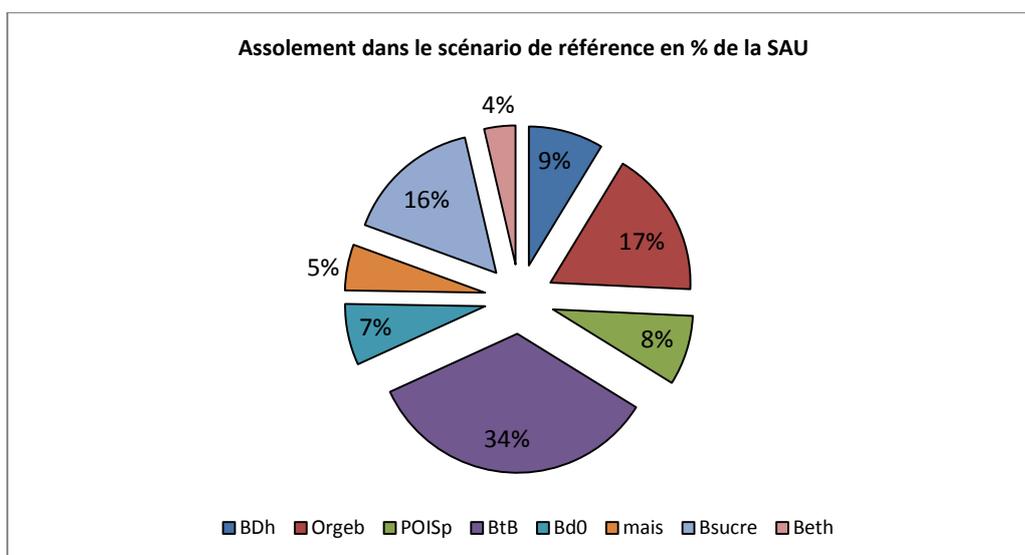
Après les céréales à paille, c'est la betterave qui occupe la deuxième place avec 20 ha dont 16 ha sont destinés à la production de sucre et le reste (4 ha) pour la transformation en éthanol.

Le colza, seule culture conduite en sec n'est pas choisi, l'agriculteur trouverait plus optimal et judicieux d'orienter ses terres et sa production vers des cultures plus rentables, tant que la disponibilité en facteur de production "eau" n'est pas limitante.

---

<sup>11</sup> Les rendements de l'orge d'hiver introduits dans le modèle sont identiques à ceux d'un blé tendre derrière une tête d'assolement, la seule différence c'est au niveau des prix de vente et des charges.

**Figure 11. Assolement global dans le scénario de référence en % de la SAU**



La répartition de ces cultures est différente d'un type de sol à un autre (tableau 7), certaines sont présentes sur les 3 types mais avec des proportions différentes, comme la betterave sucrière, et d'autres sont présentes sur un ou deux types mais absentes sur les autres, cas des autres cultures.

Pour les sols superficiels, la moitié de la surface est emblavée de blé dur (BDh), le reste est destiné à la betterave à sucre, au pois et à un peu de maïs.

Sur sols moyens, l'assolement est plus diversifié, ceci est dû au fait que ce type de sol donne des rendements plus élevés que ceux obtenus sur le premier type, on y trouve presque toutes les cultures retenues dans l'assolement global mis à part le blé dur (les deux catégories) et la betterave éthanol, avec la dominance de blé tendre et de l'orge de brasserie, qui occupent un peu plus de deux tiers du disponible en S2.

Les sols profonds à leur tour ont un assolement assez diversifié avec le blé tendre qui y domine suivi de la betterave à sucre et du Bd0.

La répartition des cultures sur les trois types de sols, tient compte de la marge que ces cultures dégagent par type de sol (Annexe 2, tableau 2), et des différentes contraintes auxquelles elles sont soumises : disponibilité de chaque type, rotation...

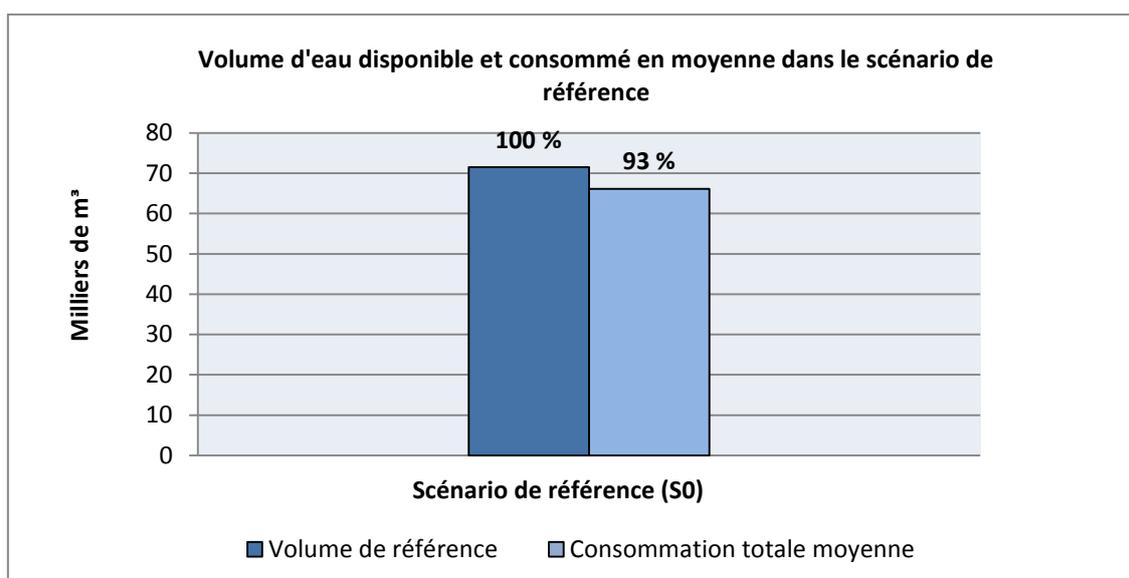
**Tableau 7. Répartition des cultures retenues sur les trois types de sol dans le scénario de référence**

	S1	S2	S3
BDh	5	0	3,6
Orgeb	0	17,1	0
POISp	1,3	6,9	0
BtB	0	20,8	13,5
Bd0	0	0	7,1
mais	0,5	4,9	0
Bsucre	3,3	5,3	7,2
Beth	0	0	3,6

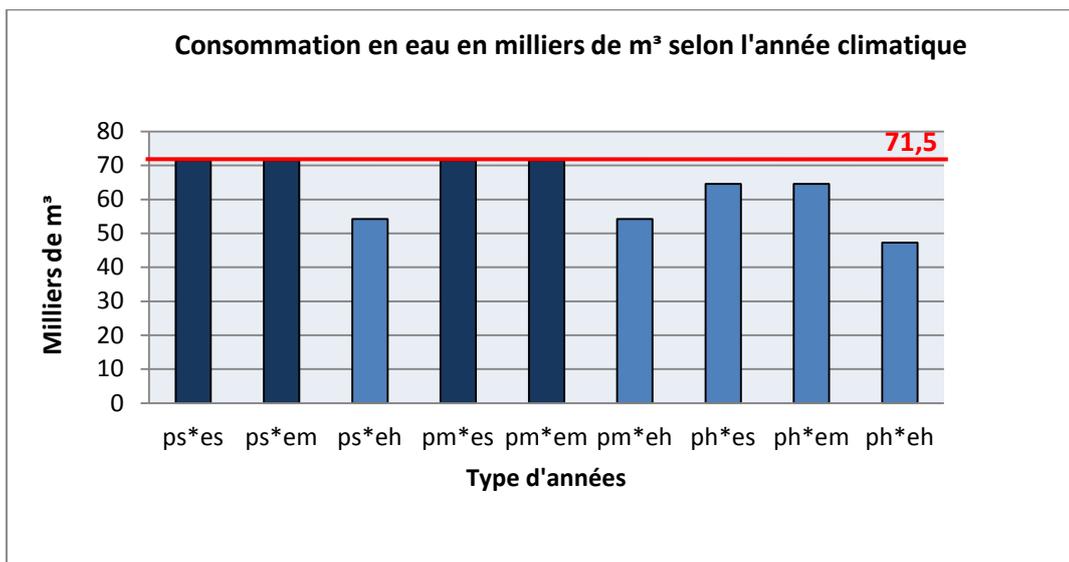
## 2. Consommation en eau

L'exploitation grandes-cultures Betterave dispose au départ d'un volume d'eau de 71 500 m<sup>3</sup>, la consommation en eau varie suivant le climat, la figure 12 montre la quantité d'eau totale moyenne consommée sur toute la campagne. En moyenne, 93% (66 000 m<sup>3</sup>) du volume disponible est utilisé pour irriguer la plupart des cultures mises en place. Toutefois, ce volume varie d'une année climatique à l'autre, où on observe en année sèche, des volumes de consommation dépassant la moyenne avec parfois une consommation totale du volume de référence. En effet, Le volume de 71 000 m<sup>3</sup> est limitant dans les états climatiques suivants : (i) printemps sec/été sec, (ii) printemps sec/été moyen, (iii) printemps moyen/été sec, (iv) printemps moyen/été moyen (figure 13, histogrammes en bleu foncé).

**Figure 12. Volume d'eau disponible et consommé en moyenne dans le scénario de référence en milliers de m<sup>3</sup>**



**Figure 13. Consommation en eau selon l'année climatique dans le scénario de référence en milliers de m<sup>3</sup>**



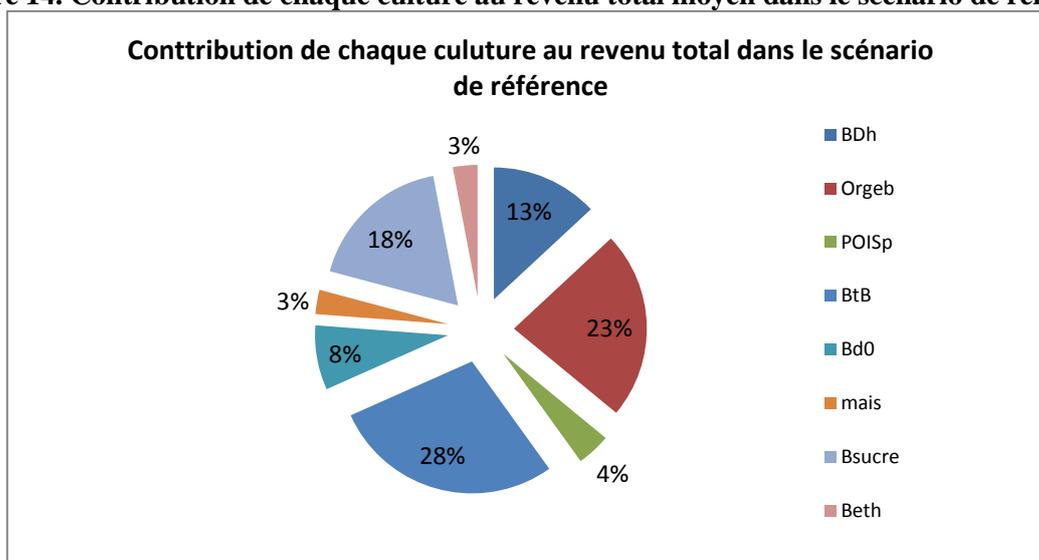
➤ *Choix des doses*

Dans le scénario de référence, le choix des doses dépend avant tout du type de sol et de l'année climatique. Afin d'avoir un rendement satisfaisant, proche du rendement objectif l'agriculteur déciderait d'irriguer la quasi-totalité des cultures (Annexe 2, tableau 3).

### 3. Revenu

Le revenu total moyen généré par les différentes activités et en bénéficiant d'une prime de type DPU d'un montant de 203 € par ha de SAU, s'élève à un peu plus de 140 000 € ce qui correspond à un revenu par hectare d'un montant de 1 427 €. Ce revenu est assuré principalement par les activités prédominantes telles que le blé, l'orge de brasserie et la betterave, avec en tête le blé tendre qui contribue à raison de 28% au revenu total moyen (figure 14 et annexe 2, tableau 4).

**Figure 14. Contribution de chaque culture au revenu total moyen dans le scénario de référence**



## II. Scénario prix (S1)

Dans ce scénario, on étudiera l'effet des différents niveaux de prix de l'eau sur le choix de l'agriculteur en terme d'assolement, de stratégies d'irrigation et les conséquences que cela pourrait engendrer sur le revenu total et la consommation en eau au niveau de l'exploitation.

### 1. Assolement

Pour un volume d'eau de référence fixé à 71 500 m<sup>3</sup> mais avec des niveaux de prix d'eau qui ont tendance à augmenter, on observe des changements au niveau de l'assolement global de l'exploitation (Figure 15).

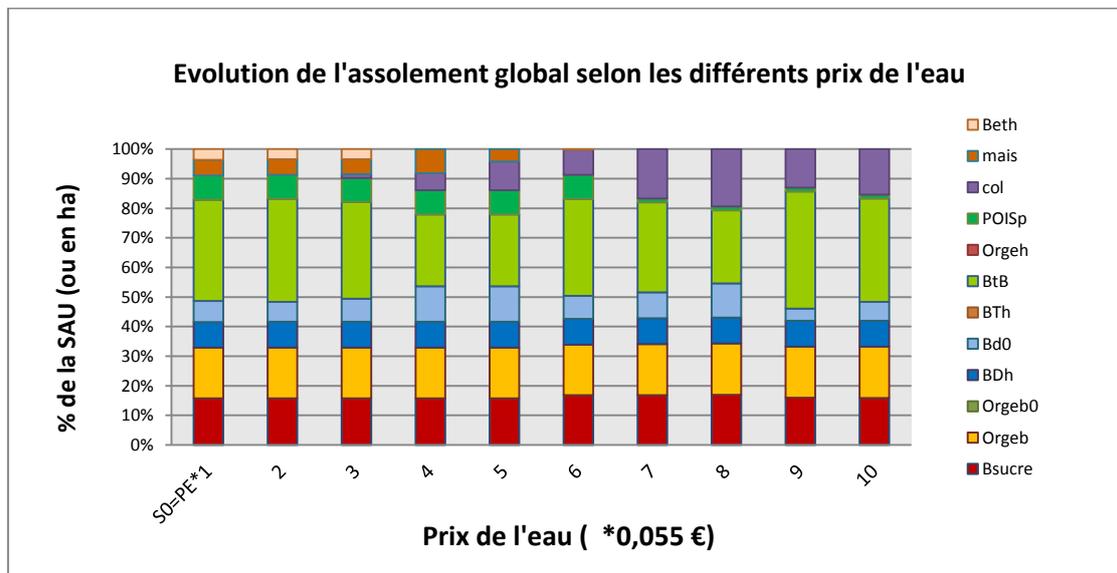
Quel que soit le prix de l'eau, les surfaces destinées au blé dur d'hiver (BDh), orge de brasserie et betterave sucrière restent assez stables du fait de la marge élevée que ces cultures assurent (Annexe 2, tableau 1).

Les changements sont principalement observés au niveau des autres cultures, en effet, l'augmentation progressive du prix de l'eau entraîne une augmentation considérable de la superficie en colza qui apparaît dès que le prix atteint 0,165 €/ m<sup>3</sup> (PE\*4) et qui vient remplacer le maïs et la betterave éthanol qui sont plus exigeants en eau et relativement moins rentables, ces deux dernières cultures disparaissent respectivement à partir de PE\*6 et PE\*4.

Les superficies en pois seront réduites à leur tour à leur tour à partir d'un prix égal à 7 fois le prix initial, elles passeront de 8 ha à 1 ha seulement.

Les ajustements se font aussi sur les superficies en blé tendre derrière une céréale (BtB) et en blé dur rémunéré au prix le plus faible (Bd0) où on remarque des changements qui diffèrent d'un niveau de prix à un autre mais ne sont pas en corrélation avec l'augmentation de ce dernier.

**Figure 15. Evolution de l'assolement global selon les différents niveaux du prix de l'eau**



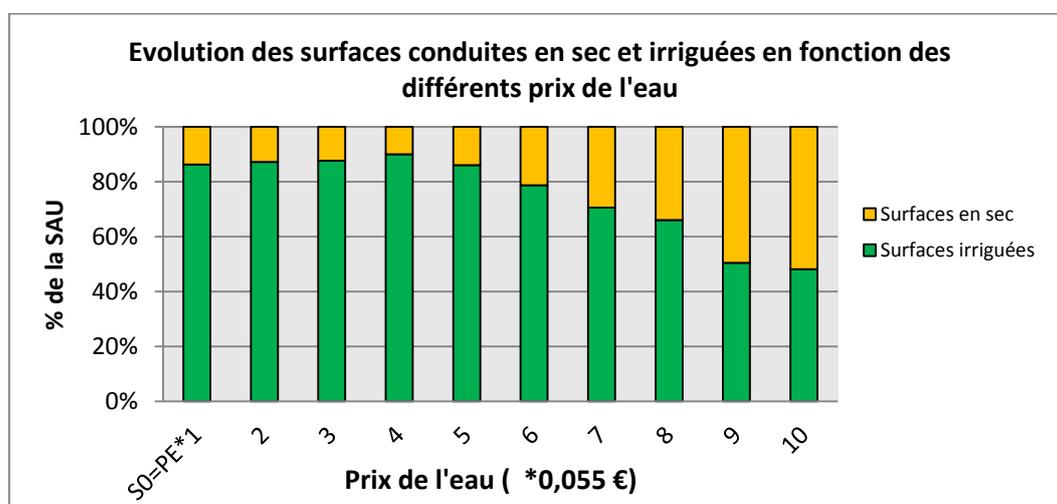
#### ➤ Evolution de la superficie irriguée et celle conduite en sec

La figure 16 montre l'évolution de la superficie irriguée et celle conduite en sec en fonction de l'évolution du prix de l'eau, on constate que l'augmentation du prix de l'eau entraîne une diminution de part de la SAU irriguée accompagnée d'une augmentation au niveau des surfaces conduites en

régime pluvial. A partir du scénario de référence jusqu'à un prix 8 fois supérieur, la surface totale moyenne irriguée reste toujours supérieure à celle conduite en sec jusqu'aux deux derniers scénarios où le prix est multiplié par 9 puis par 10, ces deux surfaces deviennent plus au moins identiques avec la surface en sec (51%) qui dépasse légèrement la surface irriguée (49%) dans le dernier scénario.

La décroissance de la part irriguée est d'abord faible, ce n'est qu'à partir de PE\*6 que cette diminution devient importante (-8%), ceci est dû essentiellement à la réduction des superficies en maïs. A partir de PE\*6, la diminution devient de plus en plus importante, ce qui peut être expliqué d'un côté par l'augmentation des superficies en colza et d'un autre côté par la baisse de la part irriguée des superficies des autres cultures comme le blé tendre et le pois conduit en sec quand le prix devient très élevé (à partir de PE\*7).

**Figure 16. Evolution des surfaces conduites en sec et irriguées en fonction des différents prix de l'eau**



Si on compare ces évolutions, selon l'année climatique, on constate que la diminution des surfaces irriguées est d'autant plus importante que l'année est humide.

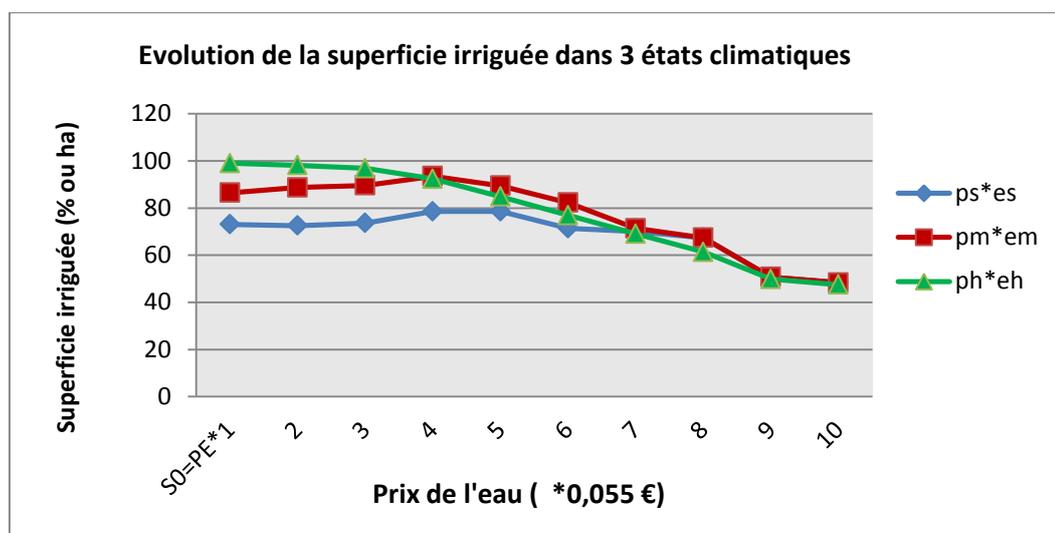
La figure 17 montre l'évolution de la superficie irriguée dans 3 états climatiques :

- printemps sec-été sec
- printemps moyen-été moyen
- printemps humide-été humide

On trouvera en annexe 3, tableau 1 les résultats détaillés concernant les superficies irriguées pour les autres types d'années

Lorsque le printemps est moyen ou sec, la superficie irriguée ne commence à décroître que lorsque le prix de l'eau atteint le niveau 6, alors qu'en printemps humide, elle commence à diminuer significativement (-8%) dès PE\*4. Ceci est dû au fait que plus la saison ou l'année est humide moins elle est sensible à la baisse des rendements et par conséquent des marges ce qui permet à l'agriculteur de diminuer les superficies irriguées tout en gardant une marge plus ou moins stable, on pourrait dire alors que la valorisation de l'irrigation à l'hectare est plus faible en saison humide.

**Figure 17. Evolution de la superficie irriguée dans 3 états climatiques**



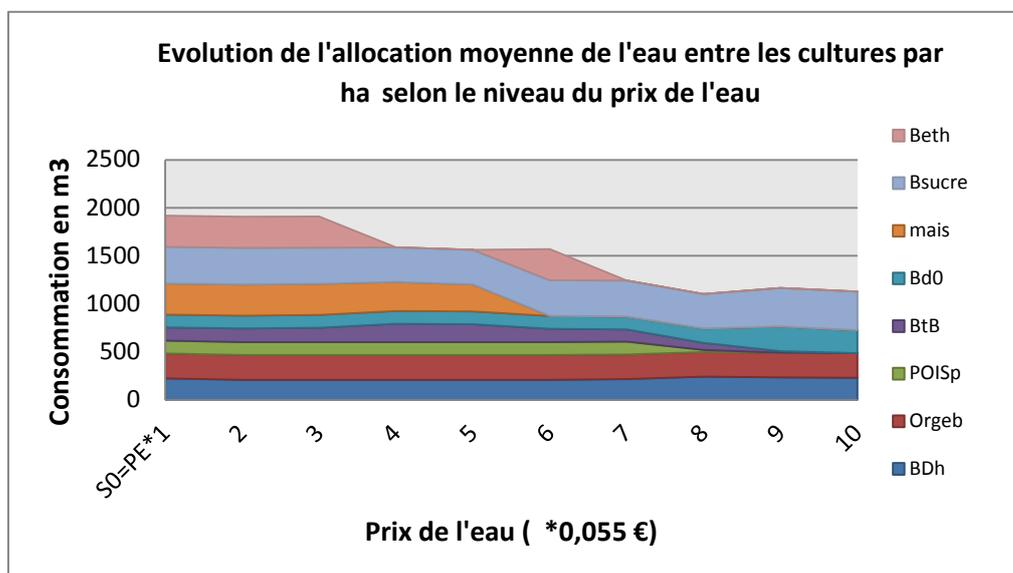
## 2. Ajustement des doses d'irrigation à l'augmentation du prix de l'eau

L'ajustement des doses en fonction des différents types de sols et du climat, selon le niveau d'augmentation du prix de l'eau est représenté en détail en annexe 3, tableau 2.

Le choix des doses d'irrigation dépend avant tout du climat et du type de sol. De manière générale, les doses choisies sont plus élevées sur des sols superficiels et pour des années sèches, que sur des sols profonds et en années humides, l'ajustement de ces doses en fonction de l'augmentation du prix de l'eau se fait en parallèle avec l'ajustement des superficies et est comme suit (figure 18 et tableau8) :

- pour la betterave éthanol et le maïs, les doses apportées en moyenne à l'hectare restent inchangées, les ajustements se font par suppression totale de ces deux cultures à partir de PE\*4 pour la betterave éthanol (elle réapparaît légèrement en PE\*6 : 0,16 ha) et PE\*6 pour le maïs.
- pour la betterave à sucre, quand le prix de l'eau n'est pas trop élevé, l'ajustement se fait par réduction des surfaces sur sols moyens et augmentation sur sols profonds qui sont les plus rentables, mais quand le prix devient très élevé l'ajustement intervient au niveau des doses par réduction de ces dernières ; sur sols superficiels, les surfaces et les doses restent assez stables jusqu'à PE\*6 pour une saison humide, et à niveau de prix plus élevé pour les autres types de saison, où on observe des adaptations par des ajustements au niveau des surfaces et/ou réduction des doses.
- le pois qui n'est cultivé que sur les sols superficiels et moyens garde les mêmes surfaces sur sols superficiels, où il va subir des réductions de doses par la suite (en sec) quand le prix de l'eau devient très élevé ; sur sols moyens ; il n'y a eu aucun changement avant PE\*7, mais à partir de ce niveau le pois ne serait plus cultivé sur ce type de sols.
- l'augmentation du prix de l'eau conduit à des réductions de doses sur l'orge de brasserie également en cas de saison humide seulement, les superficies restent stables.
- pour le blé tendre et le blé dur (Bdh), on observe à la fois des variations de surfaces en fonction de l'année et du type de sols (réduction ou augmentation) et une diminution des doses d'eau apportées (en sec pour le blé tendre).
- enfin le blé dur (Bd0) n'a pas subi de réduction des doses, par contre les surfaces ont augmenté par rapport au scénario de référence.

**Figure 18. Evolution de l'allocation de l'eau entre les cultures par ha selon le niveau du prix de l'eau**



Le tableau ci-après résume ce qui vient d'être dit en précisant les cultures qui ont subi des réductions au niveau des doses apportées.

**Tableau 8. Cultures subissant des diminutions de doses lorsque le prix de l'eau augmente**

Sols	Saisons	2	3	4	5	6	7	8	9	10
S1	Humide					Bsucré	Bsucré	Bsucré	Bsucré, BDh (sec), PoisP (sec)	Bsucré, BDh (sec), PoisP(en sec)
	Moyenne							PoisP (sec)	BDh(en sec), PoisP (sec)	BDh (sec), PoisP (sec)
	Sèche						Bsucré	Bsucré	Bsucré, BDh (sec)	Bsucré, BDh (sec)
S2	Humide						OrgeB	OrgeB	OrgeB	OrgeB
	Moyenne							BtB	BtB	
	Sèche									
S3	Humide			BtB	BtB	BtB	BtB	BtB, BDh, Bsucré	BtB	BtB
	Moyenne						BtB (sec)	BtB (sec)	BtB (sec)	BtB(sec)
	Sèche					Bsucré	Bsucré	Bsucré		

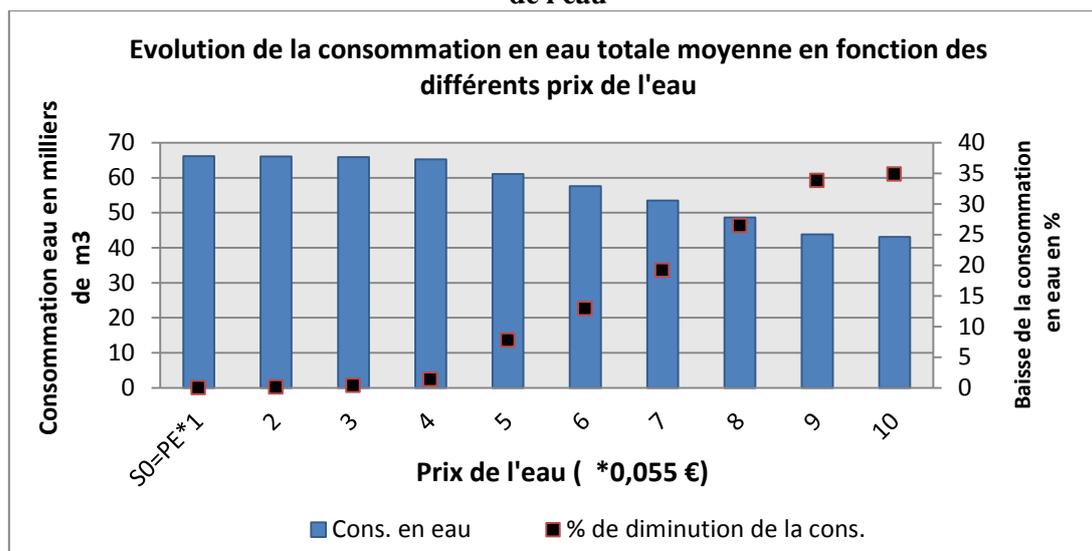
### 3. Consommation en eau

La figure 19 montre l'évolution de la consommation en eau moyenne et le niveau de la baisse de cette dernière en fonction des différents prix de l'eau.

Lorsque le prix de l'eau est multiplié par 2, 3 et 4, le volume d'eau consommé reste à peu près égal au volume consommé au départ quand le prix n'a pas été augmenté. Mais à partir d'un prix 5 fois supérieur au prix initial, ce volume commence à baisser, cette baisse est d'autant plus importante que le prix de l'eau augmente.

La diminution de la consommation s'explique par la substitution de la culture du maïs et de la betterave éthanol qui sont plus exigeantes en eau par le colza qui est conduit en sec et aussi par la réduction de la part irriguée et les ajustements faits au niveau des doses par le choix de stratégies d'irrigation plus économes (voir paragraphe II.2.2.)

**Figure 19. Evolution de la consommation en eau totale moyenne en fonction des différents prix de l'eau**



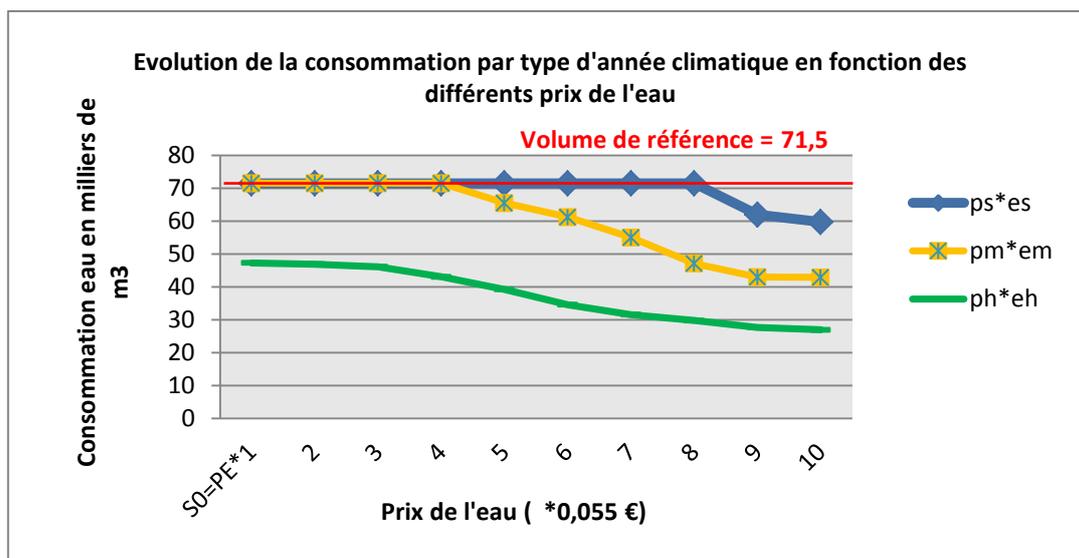
Pour un même volume de référence (71 500 m<sup>3</sup>), l'évolution de consommation en fonction des différents prix de l'eau varie d'un type de climat à un autre, la figure 20 donne la consommation en eau pour 3 types années (résultats détaillés en annexe 3, tableau 3 pour les autres types d'années).

On constate que pour une année sèche et moyenne, l'agriculteur consommerait la totalité de son volume d'eau dans le scénario de référence, et ce jusqu'à un niveau de prix PE\*4 pour une année moyenne et PE\*8 pour une année sèche, ce n'est qu'à ce moment qu'il commencerait à diminuer sensiblement son utilisation de l'eau et ce au fur et à mesure que le prix de l'eau augmente. Ceci est dû au fait que les cultures pendant une année sèche ou moyenne, sont relativement plus sensibles à la réduction des doses d'eau qui va se répercuter sur les rendements et les marges ce qui explique pourquoi l'agriculteur ne prendrait pas le risque de diminuer l'irrigation en ce types d'années.

Cependant, quand l'année est humide, la consommation dépasse légèrement les deux tiers du volume de référence dans le scénario de base, mais contrairement aux autres types d'années, cette consommation commence à diminuer légèrement dès que le prix de l'eau augmente jusqu'à partir de PE\*3 où la baisse devient de plus en plus importante ceci parce que en année humide, les rendements restent assez satisfaisants même en réduisant l'apport d'eau.

Donc, on peut dire que la réponse d'un agriculteur en terme de consommation en eau, face un contexte où le prix de cette ressource augmente différerait d'un type d'année à un autre et serait d'autant plus rapide que l'année est humide. Cette baisse de consommation résulte principalement de la diminution des superficies irriguées, des doses d'irrigation et des ajustements des assolements en faveur des cultures les moins consommatrices.

**Figure 20. Evolution de la consommation en eau par type d'année climatique en fonction des différents prix de l'eau**



➤ *Allocation du volume de référence entre les différentes cultures (figure 21)*

De manière générale et quel que soit le prix de l'eau, le volume d'eau consommé par le blé dur (les deux types) et l'orge de brasserie en printemps reste plus ou moins stable quel que soit le type de ce printemps.

L'augmentation du prix de l'eau entraîne des adaptations qui portent plus sur les cultures relativement moins rentables et qui valorisent moins bien l'eau supplémentaire apportée comme le blé tendre et le pois protéagineux, ces adaptations se font avec des réductions au niveau des doses attribuées (jusqu'à 0 m³) en fonction des différents types de sol (voir paragraphe II.2.2.).

En été, les volumes attribués à la betterave éthanol restent également stables dans les 3 états climatiques jusqu'à ce qu'elle disparaisse à partir de PE\*4. Pour le maïs, pour un prix de l'eau pas trop élevé (entre PE\*1 et PE\*3) et pour un été sec, l'agriculteur décide de ne pas irriguer les 5 ha de maïs installés même si cela lui procurerait des rendements trop faibles, cela ne va pas affecter beaucoup son revenu tant que le volume d'eau est orienté vers des cultures qui le valorisent mieux. A partir de PE\*4, ces surfaces en maïs sont irriguées par les volumes libérés par l'abandon de la betterave éthanol.

Pour un été moyen ou humide, le maïs bénéficie d'un volume d'eau stable entre PE\*1 et PE\*3, ce volume augmente légèrement en PE\*4 suite à l'augmentation des surfaces et l'abandon de la betterave éthanol, puis diminue en PE\*5. A partir de PE\*6, le maïs disparaît complètement du plan de production, c'est pourquoi le volume consommé à partir de ce niveau n'est pas indiqué dans le graphique.

Le volume alloué à la betterave sucrière reste assez stable pour un prix de l'eau situé entre le niveau 1 et 3, quel que soit le type d'été. Ce volume diminue entre PE\*4 et PE\*5 pour un été sec ou moyen et entre PE\*4 et PE\*8 pour un été humide, suite à un ajustement au niveau des surfaces de betterave qui ont connu une légère baisse d'une part et afin de réduire les charges liées à cette consommation d'eau d'autre part. Dès que le prix atteint le niveau 6 et ce jusqu'à 10 pour un été sec et moyen et les niveaux 9 et 10 pour un été humide, ce volume augmente suite à l'augmentation légère des surfaces en betterave.

Les détails de cette partie sont donnés en annexe 3, tableau 4.

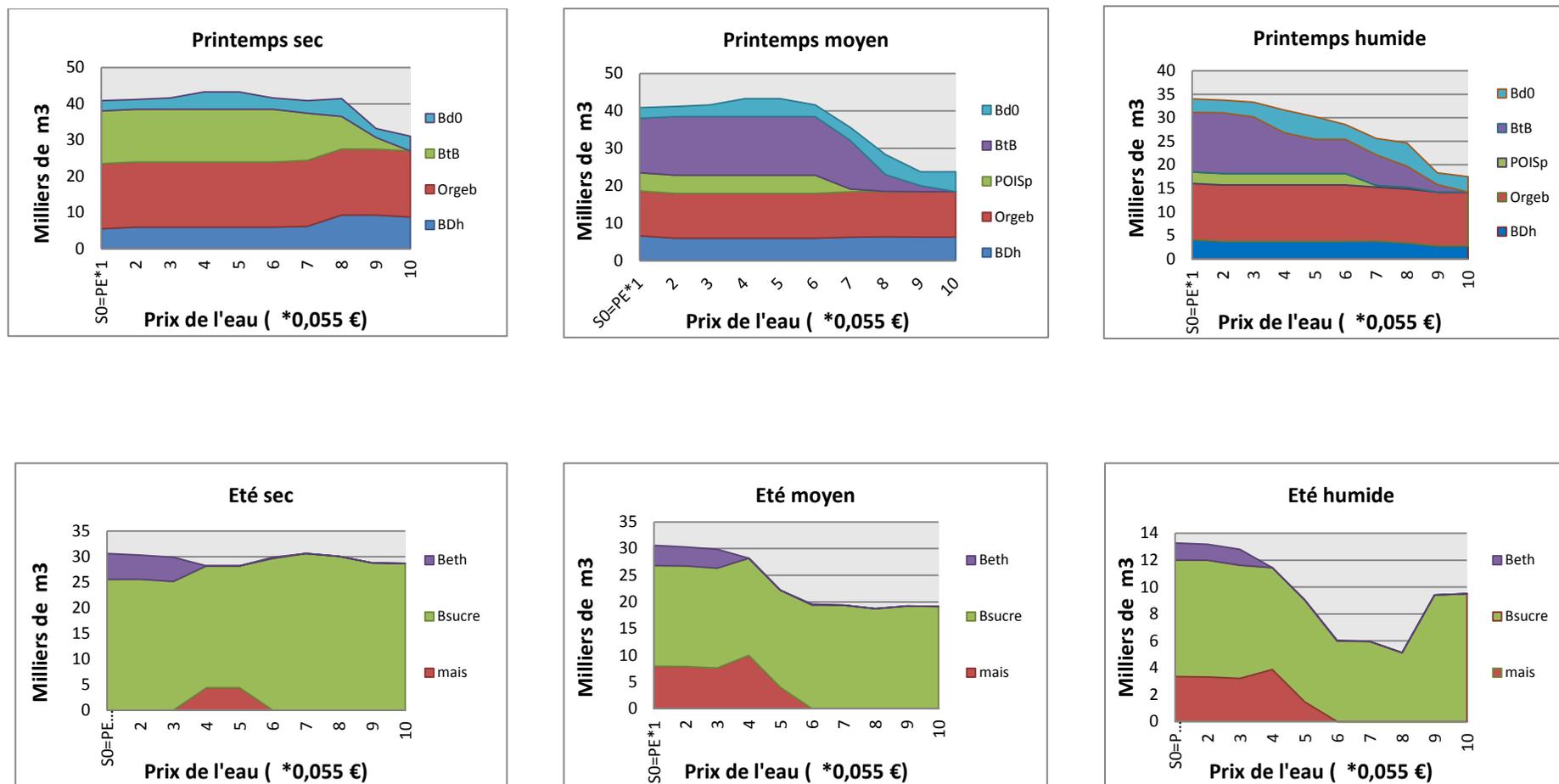


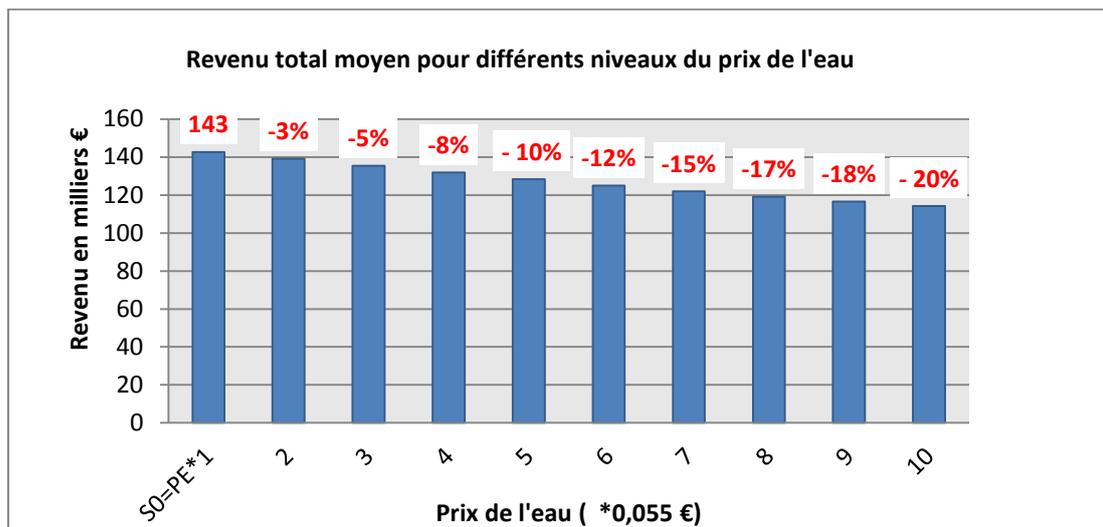
Figure 21. Evolution de l'allocation du volume de référence de 71 500 m<sup>3</sup> entre les cultures en fonction des différents prix de l'eau, pour différents états climatiques

## 4. Revenu

### a. Revenu total moyen

La figure 22 montre l'évolution du revenu total espéré de l'exploitation dans un contexte d'augmentation du prix de l'eau. Le revenu passe de 143 000 € dans le scénario de référence à 114 000 € à un prix de l'eau 10 fois plus élevé, avec une diminution de 20%.

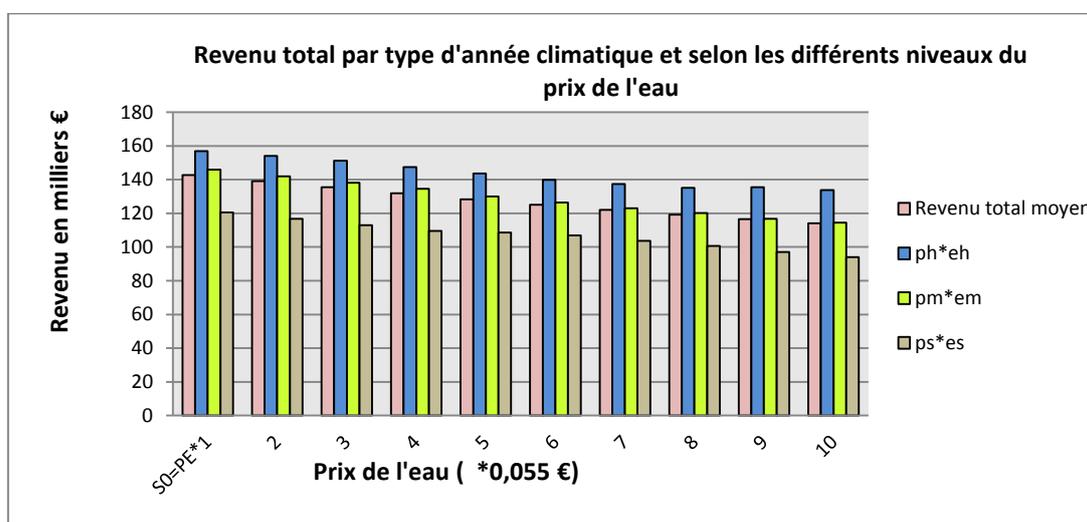
**Figure 22. Evolution du revenu total moyen selon les différents niveaux du prix de l'eau**



### b. Revenu par type d'année

On remarque une certaine corrélation entre l'augmentation du prix de l'eau et la baisse du revenu dans les différents états climatiques (Figure 23). On constate d'abord que quel que soit le prix de l'eau, le revenu en année humide reste toujours supérieur au revenu moyen alors que le revenu en année sèche y est inférieur. L'écart entre le revenu par type d'année et le revenu moyen reste plus au moins stable en fonction des différents niveaux du prix (pour les autres états climatiques, voir annexe 3, tableau 5)

**Figure 23. Revenu total par type d'année climatique et selon les différents niveaux du prix de l'eau**



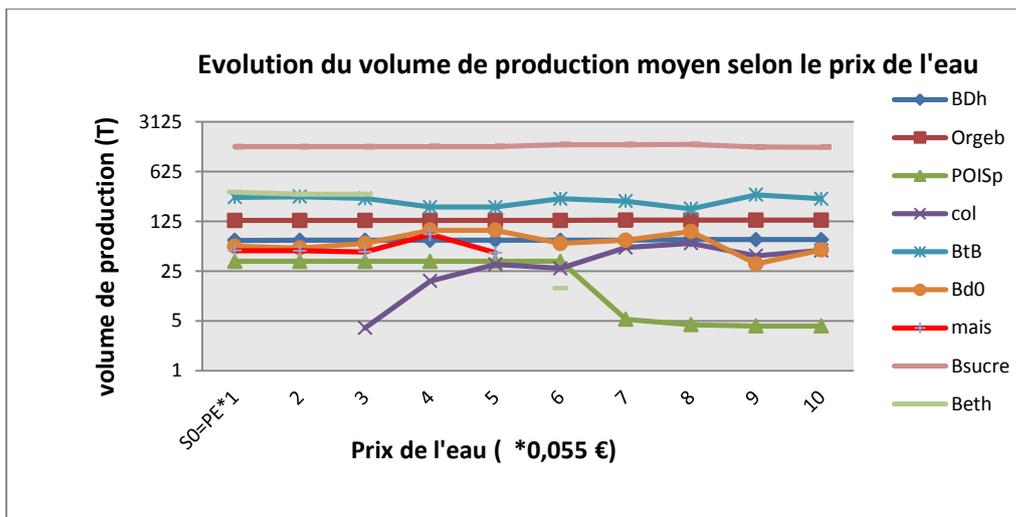
La baisse de revenu est due d'un côté à l'augmentation du prix de l'eau qui conduit à l'augmentation des charges globales et par conséquent, les marges dégagées par chaque culture au départ diminuent de plus en plus et d'un autre côté, les nouvelles stratégies d'irrigation adoptées représentées principalement par des réduction de doses et des conduites en sec, associées à des ajustement des assolements par l'introduction et/ou le développement de cultures moins consommatrices d'eau (colza) mais moins rentables ou la suppression de celles qui sont très exigeantes (maïs et betterave éthanol) a conduit certes à la réduction de la consommation en eau mais au même temps à la baisse du revenu.

La contribution de chaque culture au revenu global de l'exploitation en fonction des différents scénarios prix, évolue en fonction de l'évolution des superficies destinées à ces cultures et des doses qui déterminent les rendements (annexe 3, tableau 6).

## 5. Volumes moyens de production

Dans le scénario prix, les volumes de production sont aussi affectés par le niveau du prix, l'évolution de la production suit l'évolution des superficies, comme par exemple pour le colza et le pois où on constate une augmentation importante de la production de colza et une diminution de celle du pois suite à l'évolution des superficies destinées à ces deux cultures (figure 24).

**Figure 24. Evolution du volume de production moyen selon le prix de l'eau**



## III. Scénario eau : restriction du volume de référence

### 1. Assolement

Dans le scénario 2, la diminution des volumes de référence entraîne une diminution de la surface totale destinée aux cultures irriguées en été en faveur de celles irriguées au printemps (Figure 25). La figure 26 montre en détail, l'évolution des superficies des cultures retenues au départ, en fonction des différents niveaux de volume de référence.

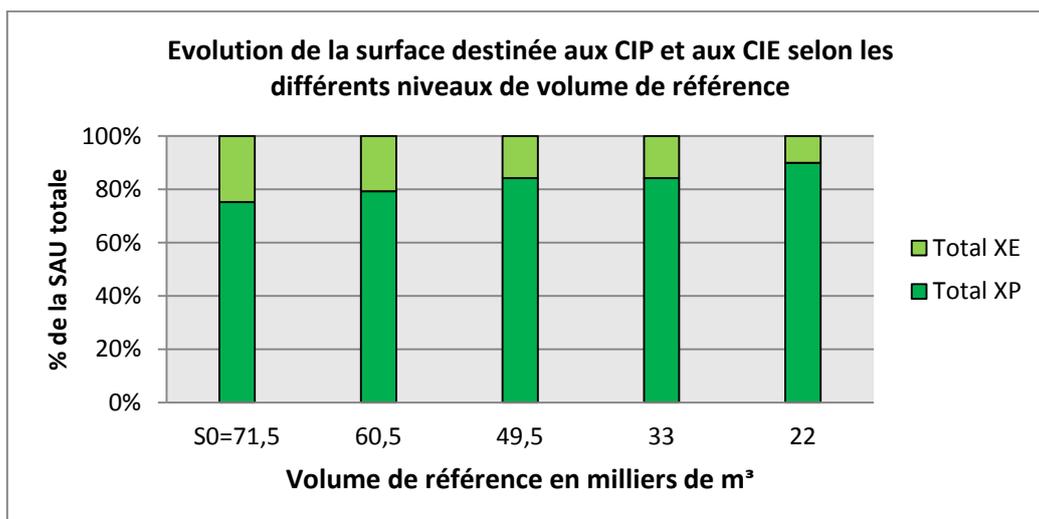
Comme dans le scénario prix, les surfaces destinées au blé dur (rémunéré au prix le plus élevé), orge de brasserie et betterave sucrière restent assez stables du fait de la marge élevée que ces cultures procurent (annexe 2, tableau 1).

Dans le cas de la diminution du volume de référence, le modèle montre que les exploitations augmenteraient leurs superficies en colza au détriment de la betterave éthanol et du maïs, ces deux

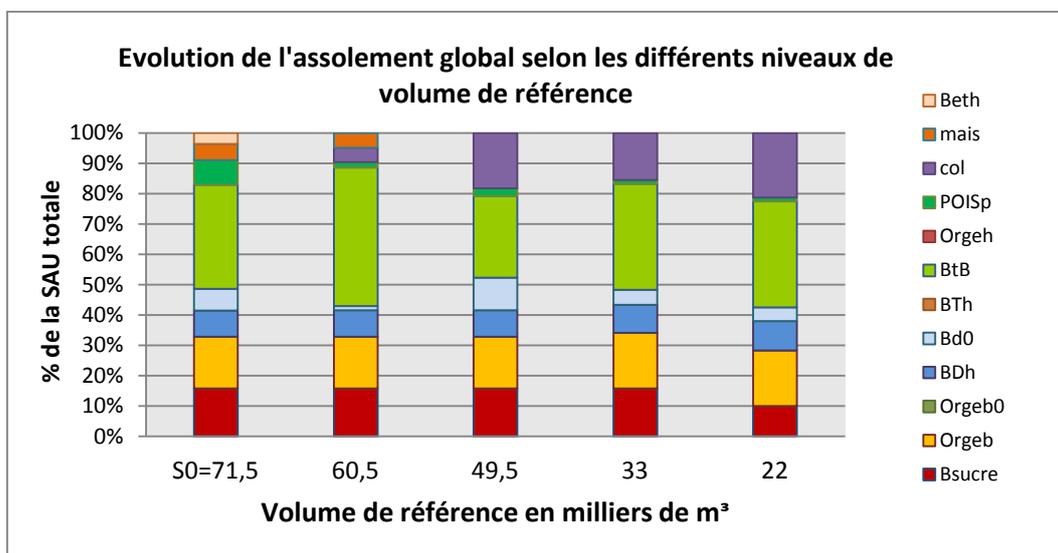
dernières étant très exigeantes en eau et relativement moins rentables disparaîtraient respectivement pour un volume de référence de 60 500 m<sup>3</sup> (-15%) et 49 500 m<sup>3</sup> (-30%). A partir de 60 500 m<sup>3</sup>, les superficies en pois diminuent à leur tour au profit du colza, passant de 8 à environ 2 ha.

Les ajustements se font également sur les superficies en blé tendre derrière une céréale (BtB) et en blé dur rémunéré au prix le plus faible (Bd0) où on constate des évolutions différentes d'un volume de référence à un autre.

**Figure 25. Evolution de la surface destinée aux CIP et aux CIE selon les différents niveaux de volume de référence**

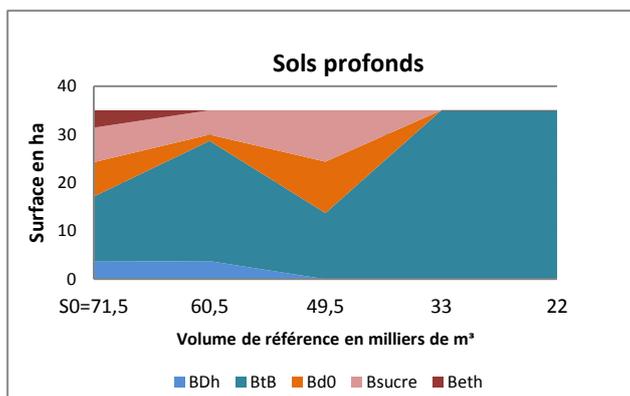
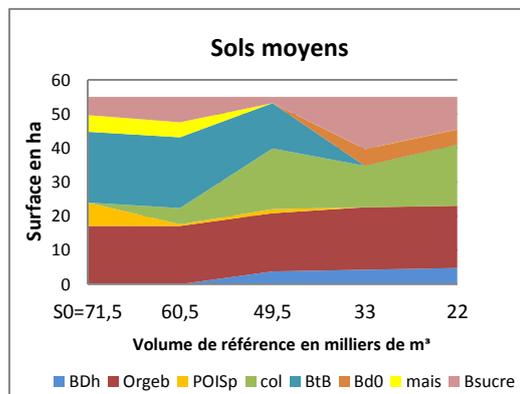
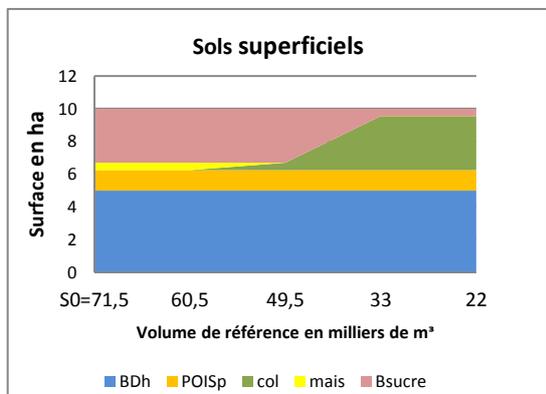


**Figure 26. Evolution de l'assolement global selon les différents niveaux de volume de référence**



Les évolutions de l'assolement se différencient aussi selon les types de sols : la répartition des cultures est plus stable sur les sols superficiels, les ajustements des superficies s'observent plus rapidement sur les sols profonds, puis sur les sols moyens et enfin lorsque le volume devient très limitant sur les sols superficiels (Figure 27).

**Figure 27. Evolution de l'assolement sur les 3 types de sol selon les différents niveaux de volume de référence**

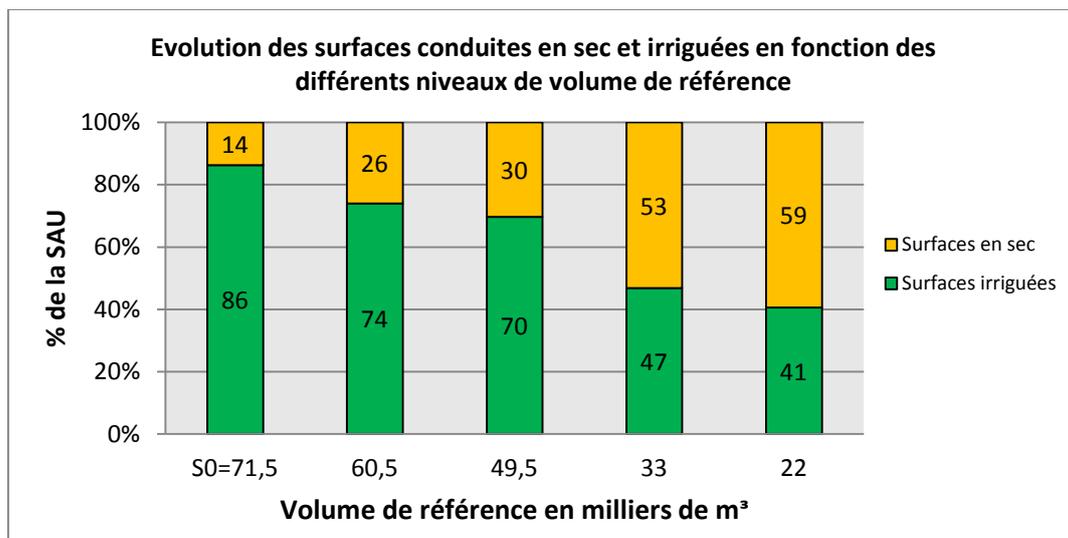


➤ **Evolution de la superficie irriguée et celle conduite en sec (figure 28)**

Lorsque le volume de référence diminue, la superficie irriguée décroît d’abord lentement, 13% puis 18%, la diminution devient plus importante (plus de 45%) quand le volume est réduit à 33 000 m<sup>3</sup>. Cette diminution est due essentiellement à la substitution des superficies de maïs et de betterave éthanol par le colza et le développement de cette dernière, et dans une deuxième mesure à la réduction des doses d’irrigation (conduite en sec de certaines cultures).

La baisse des superficies irriguées est accompagnée par une augmentation des surfaces conduites en sec, qui vont devenir plus importantes à partir d’un volume de 33 000 m<sup>3</sup>.

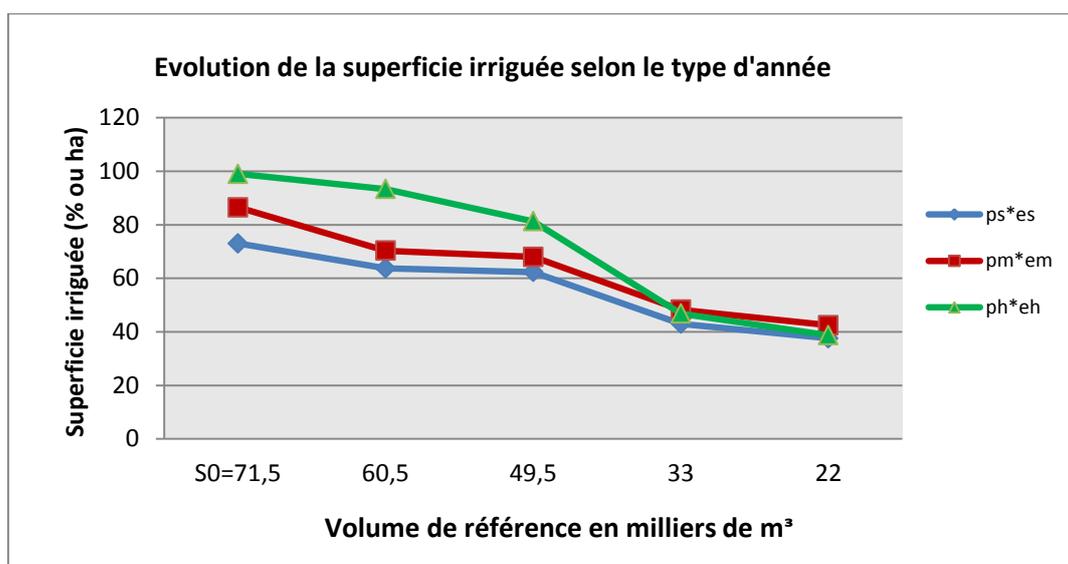
**Figure 28. Evolution des surfaces conduites en sec et irriguées en fonction des différents niveaux de volume de référence**



La figure 29 montre l’évolution de la superficie irriguée selon 3 types d’années, on trouvera en annexe 4, tableau 1, les résultats détaillés concernant les superficies irriguées pour les autres types d’années.

Quel que soit le type d’années, dès que le volume de référence est réduit, les superficies irriguées commencent à diminuer, faiblement et lentement pour une année sèche et rapidement pour une année moyenne ou humide, mais quand le volume d’eau devient très contraignant (à partir de 33 000 m<sup>3</sup>), cette diminution devient très importante dans les 3 états climatiques observés. On peut justifier cela par le degré de sensibilité des cultures face à des diminutions de l’irrigation selon le type de climat. En effet, les cultures sont plus sensibles à des réductions de doses qui se répercutent sur le rendement en année sèche, cette sensibilité diminue quand la saison devient plus humide, ce qui explique la réduction des superficies irriguées soit faible et lente au départ pour une année sèche. Quand le volume devient de plus en plus limitant, l’agriculteur diminuerait de plus en plus les doses d’irrigation et augmenterait en superficies des cultures moins consommatrices, et ce sans trop tenir compte du climat.

**Figure 29. Evolution de la superficie irriguée selon le type de printemps**



## 2. Ajustement des doses d'eau \*/&- 0 +3..3

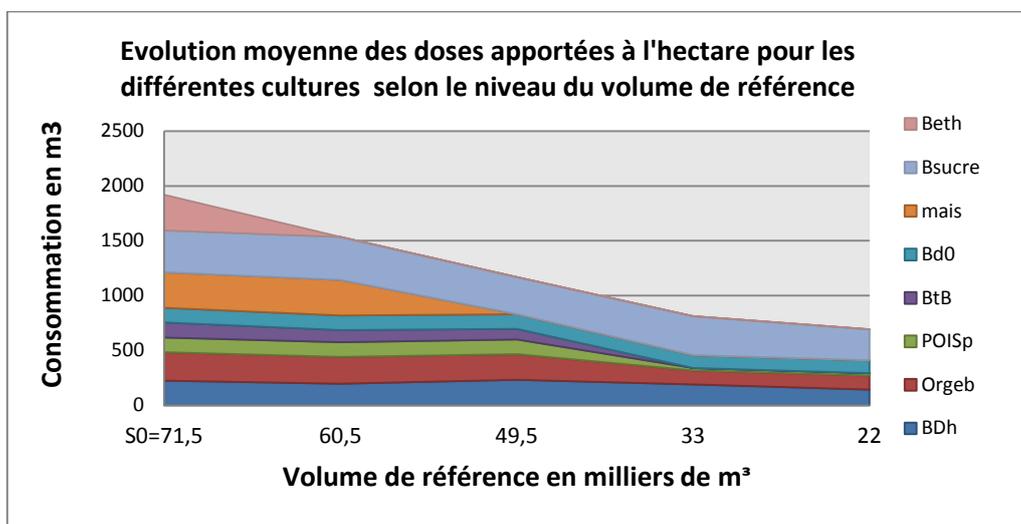
L'ajustement des doses en fonction des différents niveaux du volume de référence est représenté en détail dans l'annexe 4, tableau 2.

Le choix des doses d'irrigation dans ce scénario dépend en grande partie du volume d'eau disponible, notamment quand ce dernier est très limitant, et dans une moindre mesure du climat et du type de sol.

Tout comme dans le scénario 1, les doses choisies sont plus élevées sur des sols superficiels et pour des années sèches, que sur des sols profonds et en années humides. L'ajustement des doses en fonction du volume d'eau est comme suit (figure 30 et tableau 9) :

- Pour le maïs, les doses apportées en moyenne à l'hectare restent plus ou moins les mêmes, les ajustements se font par élimination de cette culture quand le volume est réduit à 49 500 m<sup>3</sup>.
- Pour l'orge de brasserie, les superficies globales demeurent stables, les ajustements se font par réduction des doses apportées, tandis que pour le Bd0 les doses restent stables quel que soit le volume de référence, c'est les surfaces qui varient en fonction du climat et du type de sol pour les différents volumes de référence.
- Pour le pois sur sols superficiels, les surfaces restent inchangées, on observe seulement une réduction des doses quand le volume devient très contraint (33 000 et 22 000 m<sup>3</sup>), par contre les surfaces du pois sur sols moyens ont diminué au début et quand le volume est très limitant, cette activité est complètement supprimée.
- Pour le blé tendre et le blé dur (Bd0), les superficies globales sont très variables d'un volume à un autre, alors que celles de la betterave à sucre restent stables jusqu'à 22 000 m<sup>3</sup> où elles diminuent fortement. La réduction de volume de référence conduit aussi à la réduction des doses d'eau apportées (pour la betterave et le blé dur) et de la part irriguée (pour blé tendre).

**Figure 30. Evolution moyenne de l'allocation de l'eau entre les différentes cultures pour un ha de SAU selon le niveau du volume de référence**



Le tableau suivant montre les cultures ayant subi des réductions de doses quand le volume de référence diminue.

**Tableau 9. Cultures subissant des diminutions de doses lorsque le volume de référence diminue**

Sols	Saisons	60,5	49,5	33	22
Superficiels	Humide			BDh	BDh
	Moyenne			BDh, PoisP, Bsucre	BDh, PoisP, Bsucre
	Sèche		Bsucre	Bsucre(en sec 0,45 ha)	Bsucre(en sec 0,45 ha)
Moyens	Humide			OrgeB	OrgeB
	Moyenne			OrgeB, Bsucre	OrgeB, Bsucre
	Sèche	OrgeB	OrgeB	Bsucre	Bsucre
Profonds	Humide			BtB (en sec)	BtB (en sec)
	Moyenne				
	Sèche	BDh			

### 3. Consommation en eau

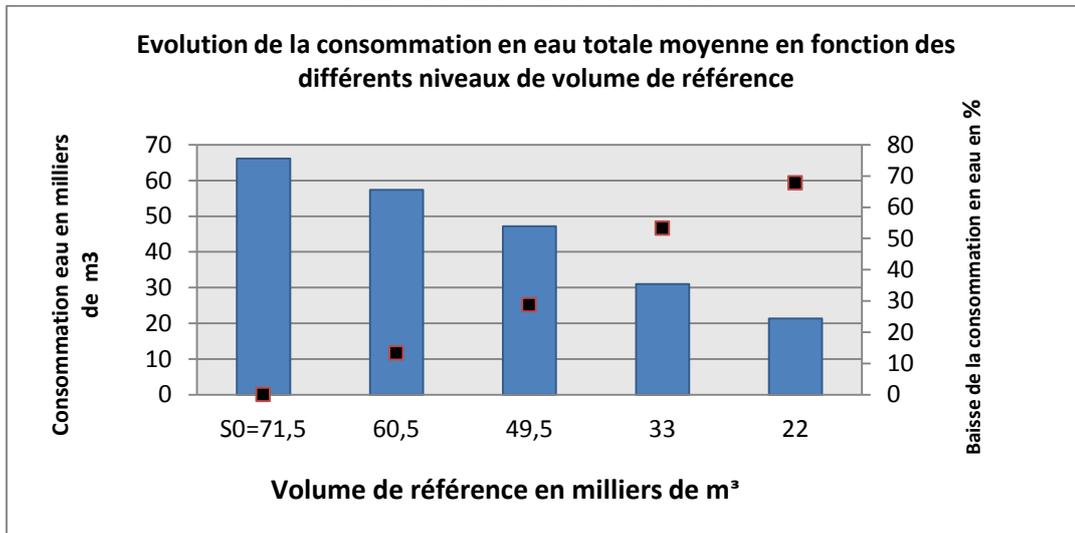
L'évolution de la consommation en eau dans un contexte de diminution de volume de référence est représentée dans la figure 31.

Pour un prix d'eau stable fixé à 0,055 € le m<sup>3</sup>, la réduction du volume de référence entraînerait l'agriculteur à diminuer sa consommation en eau puisque quel que soit le niveau de la restriction, le type du climat ou du sol et la hauteur des besoins des cultures, il ne peut pas dépasser le volume dont il dispose. Cette diminution est d'autant plus importante que le volume d'eau devient très restreint (-53% et -68% pour des volumes de 33 000 et 22 000 m<sup>3</sup>).

Afin de respecter le quota d'eau, l'agriculteur serait obligé d'opter pour des assolements plus économes comme le développement de la culture du colza et la réduction ou l'abandon des superficies

en maïs, et aussi d'ajuster les doses d'irrigation en fonction de ces disponibilités en ressources hydriques.

**Figure 31. Evolution de la consommation en eau totale moyenne en fonction des différents niveaux de volume de référence**

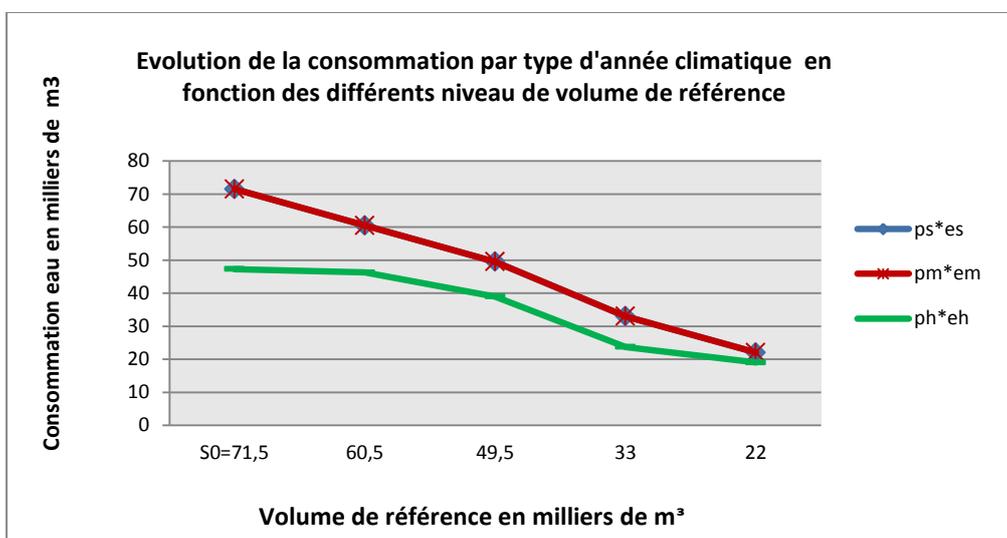


La figure 32 donne la consommation en eau pour 3 types années (résultats détaillés en annexe 4, tableau 3 pour les autres types d'années).

De manière générale et quel que soit le volume de référence, la consommation en eau en année sèche et moyenne reste supérieure à la consommation totale moyenne, avec la totalité du volume de référence qui est utilisée. En ces années, où l'agriculteur consommerait le plus, il commencerait à baisser sa consommation dès que le volume de référence diminue pour ne pas dépasser le nouveau quota.

Quand l'année est humide, la consommation est beaucoup moins élevée que les deux autres types d'années d'où la réduction de la consommation qui ne commence que lorsque le volume atteint 49 500 m<sup>3</sup>.

**Figures 32. Evolution de la consommation par type d'année climatique en fonction des différents niveaux de volume de référence**



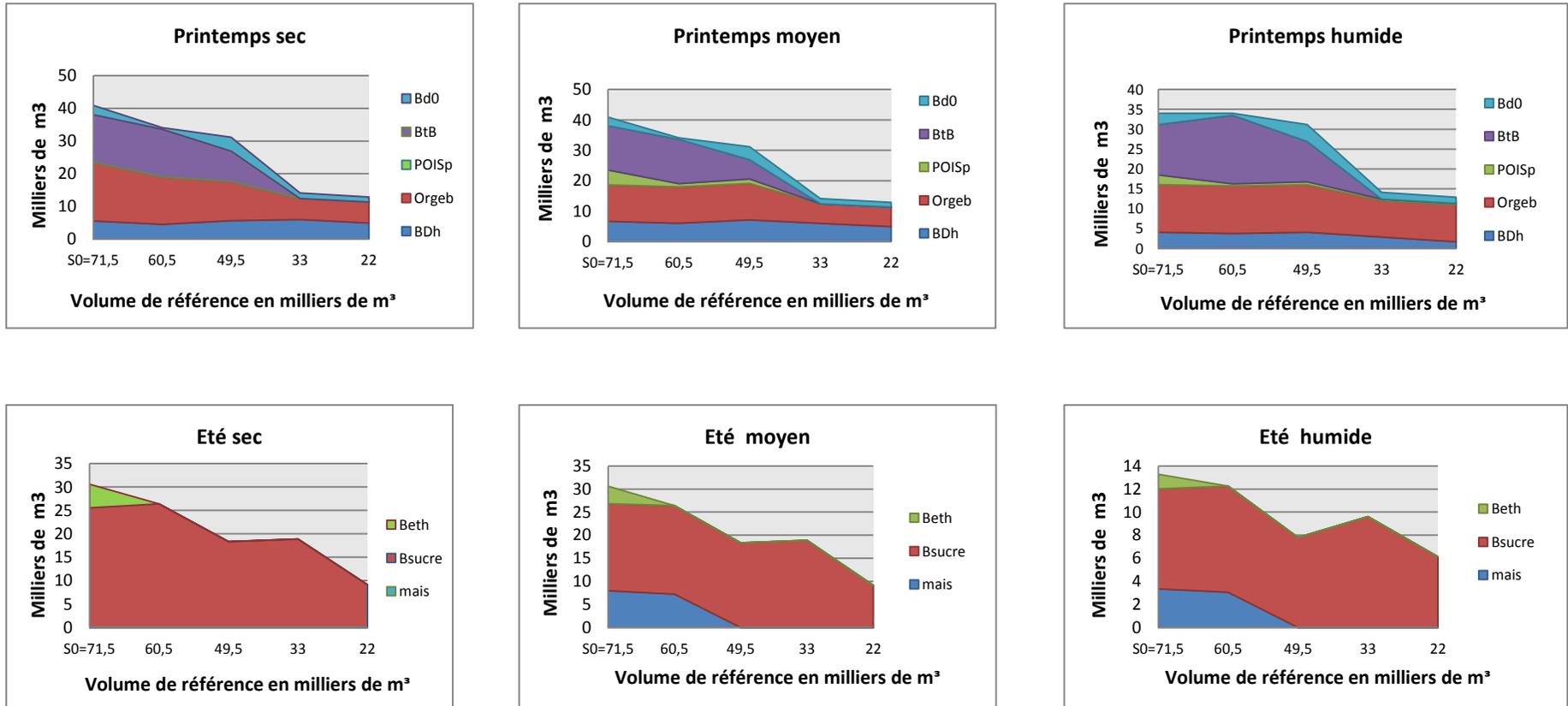
➤ *Allocation du volume de référence entre les différentes cultures (figure 33 et annexe 4, tableau 4):*

On remarque que pour la majorité des cultures, l'allocation de l'eau en fonction des différents niveaux du volume de référence est quasiment identique pour les trois types de printemps mais différent d'une culture à l'autre.

Les volumes alloués à l'orge de brasserie et au blé dur sont moins variables que ceux destinés aux autres cultures. Les adaptations à la réduction du volume de référence portent plus sur le blé tendre et le pois par diminution de la part irriguée (conduite en sec à partir de 33 000 m<sup>3</sup> : pour le pois en saison moyenne et quel que soit le volume de référence en saison sèche, et pour le blé tendre pendant les trois types de printemps) (voir chap. II. paragraphe 2).

En été, les ajustements se font sur toutes les cultures : le maïs est conduit en pluvial en cas d'un été sec (afin d'orienter le volume d'eau vers d'autres cultures plus rentables), et supprimé de l'assolement à partir d'un volume de 49 500 m<sup>3</sup> ; la betterave éthanol disparaît à son tour à partir de 60 500 m<sup>3</sup> ; les volumes alloués à la betterave diminuent considérablement pour un volume de référence très limitant : 22 000 m<sup>3</sup> suite à la réduction de la sole betteravière de 6 ha.

**Figure 33. Evolution de l'allocation de l'eau entre les cultures en fonction des différents niveaux de volume de référence, pour différents états climatiques**

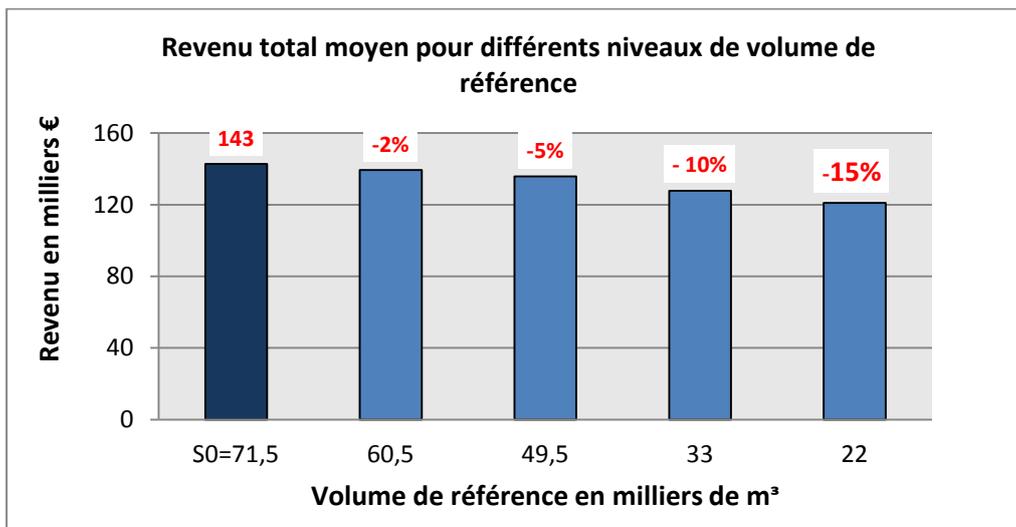


## 4. Revenu

L'évolution du revenu de l'exploitation en fonction des différents niveaux de restriction est représentée dans la figure ci-dessous.

En observant la figure 34, on constate une faible diminution du revenu total moyen calculé sur une série d'années climatiques quand le volume de référence diminue, mais cette diminution devient plus importante lorsque le volume est très critique (entre 33 000 et 22 000 m<sup>3</sup>). Cependant, cette baisse du revenu reste moins importante que celle enregistrée dans le scénario prix, on peut expliquer cela par le niveau des charges d'irrigation qui est resté stable vu que le prix de l'eau n'a pas été touché.

**Figure 34. Revenu total moyen pour différents niveaux de volume de référence**

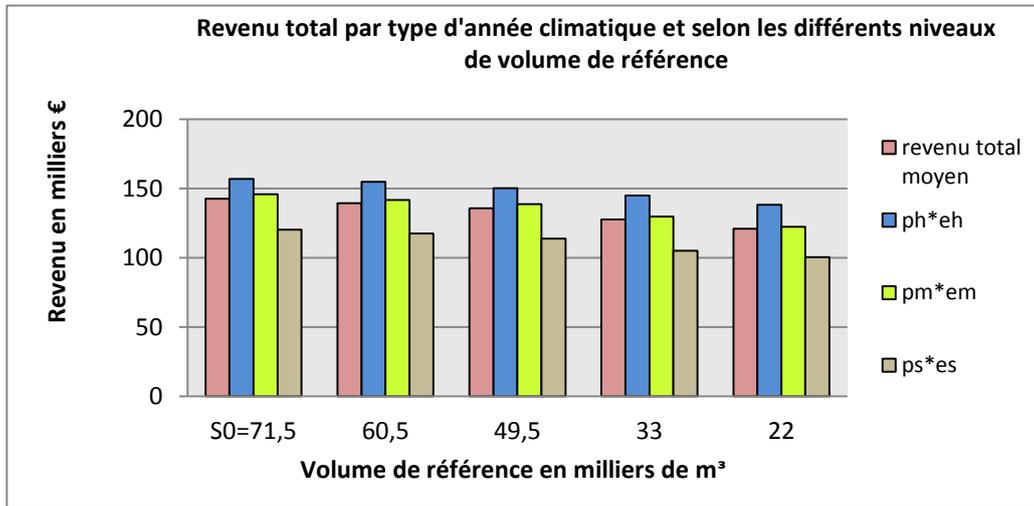


La contribution de chaque culture en % au revenu global de l'exploitation en fonction des différents niveaux du volume de référence, évolue en fonction de l'évolution des surfaces destinées à ces cultures.

### ➤ *Revenu par type d'année*

L'évolution du revenu dans les différents états climatiques indiquée dans la figure 35 montre que le revenu en année humide est supérieur au revenu moyen alors que le revenu en année sèche y est inférieur quel que soit le volume de référence. L'écart entre le revenu par type d'année et le revenu moyen reste assez stable en fonction des différents niveaux de volume (annexe 4, tableau 5).

**Figure 35. Revenu total par type d'année climatique et selon les différents niveaux de volume de référence**

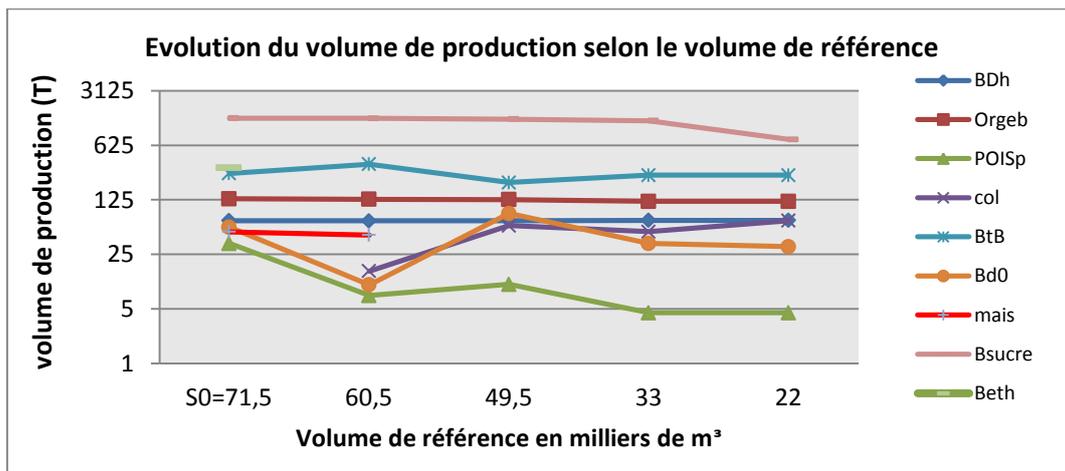


La baisse du revenu enregistrée se justifie principalement par la réduction de la part irriguée en SAU et la diminution des doses d'eau apportées qui conduisent à des pertes de rendements, ainsi que par le développement de certaines cultures qui sont relativement moins rentables (colza).

### 5. Volumes des productions

L'évolution du volume de production dépend de l'évolution des superficies, quand la superficie augmente ou diminue, la production la suit (cas du colza, Bd0).

**Figure 36. Evolution de la production selon les différents niveaux de volume de référence**



# Chapitre III. Synthèse des résultats et discussion

## I. Synthèse et comparaison des deux scénarios

Après avoir analysé chaque scénario séparément, on va maintenant analyser ces deux mesures ensemble dans un objectif de comparaison des impacts que leur mise en œuvre pourrait engendrer au niveau de l'exploitation (économiques : perte de revenu par ha et environnementaux : baisse de la consommation).

Il est important de rappeler que les niveaux de prix de l'eau et de coefficient de nappe sont connus suffisamment à l'avance, bien avant le choix des assolements.

Quel que soit le scénario, les changements effectués que ce soit sur le volume de la ressource en eau ou le prix d'accès à cette ressource entraîneraient des adaptations plus ou moins semblables au niveau de l'assolement global. Elles se caractérisent principalement par des ajustements des superficies des différentes cultures : réduction des surfaces ou suppression des cultures très exigeantes comme le maïs et la betterave éthanol et qui s'avèrerait moins rentables, et mise en place ou développement de cultures moins consommatrices (colza et blé tendre). Les superficies des cultures dégagant des marges élevées comme le blé dur, la betterave à sucre et l'orge de brasserie resteraient assez stables.

Les adaptations se feraient aussi par des réductions au niveau des doses apportées aux cultures et diminution de la part irriguée en favorisant toujours les cultures qui valorisent le mieux la ressource en eau et en prenant moins de risque (baisse de rendements) sur les sols les plus superficiels qui ont une marge de manœuvre très réduite pour diminuer les doses appliquées ou modifier le pilotage de l'irrigation.

Ces différents changements entraîneraient une réallocation des ressources en eau disponibles et des terres dans le but de diminuer la consommation ce qui conduirait à des rendements plus bas ou à des marges générées par les nouvelles activités moins élevées. La baisse du revenu est donc inévitable (observée dans les deux scénarios). Cependant, l'évolution du revenu selon les différents niveaux de prix et de volume de référence ne serait pas la même. En effet la chute de revenu serait plus rapide et plus importante dans un scénario prix, le revenu serait donc plus sensible à l'augmentation des charges liées à l'irrigation qu'à une diminution des disponibilités en eau.

Le tableau ci-contre qui compare les coûts/efficacité de chaque scénario en reprenant la réduction de la consommation en eau et la baisse du revenu générées par chaque politique confirme cette hypothèse où on constate que pour un même objectif de réduction de la consommation (-13%), l'agriculteur paierait 6 fois plus cher l'eau d'irrigation et perdrait en moyenne 177 €/ ha (-12% du revenu) dans le scénario 1, alors que dans le scénario 2, la réduction du volume de référence à 60 500 m<sup>3</sup> pour une réduction de la consommation de 13% n'engendrerait que 33 €/ ha (-2% du revenu) de pertes.

Par ailleurs, une diminution du volume d'eau jusqu'à 22 000 m<sup>3</sup> entraînerait une baisse de revenu assez importante estimée à 216 €/ ha (-15% du revenu) pour une réduction de la consommation très significative 68% dans le scénario 2. Cependant, pour une même perte de revenu (entre 208 et 236 €/ ha), l'agriculteur ne réduirait sa consommation que de 20 voire 25% dans le scénario 1.

**Tableau 10. Comparaison coûts/efficacité des deux scénarios**

Scénarios	Réduction de la consommation en eau (%)	Perte de revenu (€/ ha)
	0,12	36
	0,38	73
	1	109
	8	144
Augmentation du prix de l'eau	13	177
	19	208
	26	236
	34	262
	35	286
		13
Réduction du volume de référence	29	69
	53	149
	68	216

De manière générale, les alternatives de production choisies dans les deux scénarios seraient très proches, mais la réduction des volumes de référence dans le scénario 2 aurait un impact plus limité sur le revenu moyen que le scénario prix ; ceci est dû au fait que dans ce dernier, les charges liées à l'irrigation augmentent considérablement. Et il semblerait aussi que la réduction des volumes de référence serait plus incitative à consommer moins que l'augmentation du prix de l'eau, il faudrait en effet multiplier ce prix par 7 voire plus afin que cet instrument devienne incitatif.

## II. Discussion et perspectives

Les résultats auxquels a abouti cette étude montrent que l'irrigation joue un rôle important dans la stabilisation des rendements et donc des revenus agricoles. Le rôle de l'irrigation se confirme par la diminution des revenus qu'on observe dès que la quantité d'eau disponible au niveau de l'exploitation diminue et/ou son prix augmente.

En absence d'intervention publique, l'agriculteur pour maximiser son revenu choisit les meilleures combinaisons possibles entre les différents types de sols, doses et dates d'apport d'eau et le choix des cultures, en fonction du type de climat auquel il fait face. Par ailleurs, pour mieux rentabiliser chaque hectare cultivé, il va irriguer la quasi-totalité des cultures choisies dans l'assolement global. Mais en présence de mesures visant à réduire le volume d'eau dont il dispose, ou à augmenter son prix, l'agriculteur serait contraint à réduire sa consommation en eau soit pour ne pas dépasser le quota imposé (dans le S2) soit pour réduire les charges liées à l'irrigation (dans le S1). Cependant, les résultats montrent qu'en aucun cas il pourrait conserver le même niveau de revenu. L'intensité de la baisse des revenus varie d'une situation à une autre mais sa baisse reste inévitable.

L'augmentation du prix de l'eau et du coefficient de nappe sont deux opérations faciles à mettre en place mais leur efficacité et/ou leur acceptabilité par les agriculteurs n'est pas garantie. En effet, comme on vient de le voir, le montant du prix de l'eau est très insuffisant pour inciter à l'économie de l'eau et son augmentation conduirait plus à la diminution des revenus qu'à une baisse de la consommation. En outre, il a été démontré dans des études antérieures (Brunel 2007 et 2009) et lors des ateliers<sup>12</sup> participatifs organisés dans le même cadre (Comité technique du 26 mai 2011), que des coefficients de nappe très restrictifs ( $\leq 0,3$ ) sont jugés peu vraisemblables d'un point de vue politique et économique et inacceptables par les agriculteurs, et qu'à ce niveau, certains agriculteurs choisiraient

<sup>12</sup> L'objectif des ateliers est d'évaluer l'impact des restrictions de volumes d'eau prélevable sur les assolements et les résultats économiques des exploitations ainsi que sur l'organisation des filières locales.

de quitter la zone et de s'installer dans une autre région où les mesures de gestion sont moins contraignantes.

C'est pourquoi nous pensons qu'il sera utile de tester l'effet d'autres politiques (marchés de l'eau, subvention de matériels économes...) ou bien la combinaison entre ces deux mesures (avec des niveaux de prix et de coefficient de nappe plus réalistes) potentiellement plus efficaces, avec moins d'impacts sur le revenu et plus acceptables par les agriculteurs.

Les résultats obtenus dans cette étude ne concernent qu'une zone parmi les 5 groupes définis, cette zone selon sa localisation est caractérisée par un climat défini, des types et des proportions de sols différentes des autres zones et marquée par une orientation des systèmes de culture vers les grandes cultures associées à la betterave. Il serait intéressant et complémentaire de voir dans des études ultérieures l'impact que pourraient avoir les mesures envisagées sur d'autres exploitations situées dans des endroits différents et avec des contraintes pédo-climatiques dissemblables et de comparer les résultats afin de déceler l'importance des contraintes spatiales dans ces études et la diversité des comportements des agriculteurs qui pourraient être observés selon la localisation de leur exploitation et aussi d'évaluer l'effet des différentes politiques de gestion de l'eau sur le comportement global des agriculteurs à l'échelle régionale.

Les modèles conçus dans cette étude sont assez génériques, ils pourraient être appliqués dans n'importe quelle zone où la question de l'eau fait l'objet de l'étude, caractérisée par plusieurs périodes de décision, des aléas climatiques, des activités différentes par cultures, types de sols et stratégies d'irrigations et des contraintes (rotations, production..) très proches. Il suffirait juste d'ajuster les données technico-économiques, la liste des activités, les données internes à l'exploitation et les caractéristiques de chaque zone.

Cependant, ces modèles peuvent être améliorés pour qu'ils reproduisent au mieux la réalité. Il faudrait peut-être revoir les hypothèses de modélisation émises au départ comme la prise en compte de la main-d'œuvre, des nouveaux investissements etc. et peut-être construire des modèles qui analysent les conséquences de telles mesures à moyen et à long termes (modèles multi-périodiques). On pourrait également comparer ces résultats avec les résultats issus d'un modèle tenant compte de l'aversion au risque des agriculteurs (risque de variabilité des prix, des rendements et du coefficient de nappe) dans la fonction objectif.

## Conclusion

Le développement de l'irrigation dans la Beauce a conduit à une exploitation intensive de la ressource en eau, représentée principalement par la nappe de Beauce, cette dernière suite à des baisses fréquentes de son niveau et à la prise de conscience par les usagers de sa fragilité, a fait l'objet à partir de 1999 d'une gestion volumétrique.

La mise en place de la gestion volumétrique de l'eau d'irrigation ou d'autres instruments de gestion pose la question de leurs impacts sur les exploitations agricoles irrigantes en termes d'assolement, de consommation en eau et de revenus.

Afin de mesurer l'ampleur de ces impacts, plusieurs études ont été réalisées (Brunel 2007 et 2009, Morardet et Hanot 2000...). Ce travail qui s'inscrit dans le même cadre a comme particularité la prise en compte de la localisation des exploitations à l'intérieur d'un territoire caractérisé par une grande hétérogénéité pédo-climatique. En d'autres termes, les informations spatiales -en matière de climat et types de sols- des exploitations ont été prises en compte afin de voir la diversité des réponses selon la situation géographique. Pour cela, nous avons classé le territoire en 5 grandes zones distinctes par leurs climats et nous avons choisi dans un premiers temps de focaliser l'étude sur une seule zone (n°5) caractérisée par un climat relativement plus sec en printemps et en été et plus variable et où sont principalement localisées les exploitations betteravières.

Dans ce but, il a fallu d'une part construire un modèle économique et d'autre part, réunir les informations et les données nécessaires à son utilisation. Le modèle que nous avons choisi est un modèle stochastique discret qui prend en compte la variabilité du climat et son impact sur les rendements.

Les données climatiques spatialisées de la zone choisie ont servi d'inputs dans le modèle de culture Pilote, qui en intégrant d'autres données relatives aux sols, plantes et conduite d'irrigation nous a donné des estimations de rendements en fonction des différentes stratégies d'irrigations proposées. Les simulations sur Pilote et le temps consacré à la construction du modèle économique ont fait défaut par la suite pour diriger l'étude vers d'autres zones et d'autres types d'exploitations et pour tester plusieurs scénarios de gestion. C'est pourquoi nous n'avons analysé que le comportement des exploitants du type GC-Betterave situées dans la zone 5 et nous n'avons testé que deux scénarios :

- 1- Scénario prix : en multipliant le prix de l'eau par 1 jusqu'à 10.
- 2- Scénario eau : diminution du volume de référence.

Le modèle conçu a été utilisé pour expliciter le comportement et les stratégies d'adaptation des agriculteurs soumis à des restrictions d'eau ou se trouvant face à une situation de forte augmentation du prix de cette ressource et en évaluer les conséquences économiques qui en résultent. Ces adaptations sont analysées aussi par type sol et selon la situation climatique de l'année.

De manière générale et quelle que soit la mesure envisagée, les résultats ont abouti à deux voies d'adaptations possibles :

- une adaptation par modification de l'assolement,
- et une adaptation par réduction de la quantité d'eau apportée aux cultures.

Les résultats montrent aussi une sensibilité des exploitations au prix de l'eau, l'augmentation de ce dernier conduirait à une perte importante au niveau du revenu, cette perte est observée aussi dans le cas où le volume d'eau diminue mais est moins importante.

Les instruments de gestion mis en place permettent à des niveaux différents, de réduire la consommation en eau, la baisse de cette dernière est très significative dans le scénario eau, mais dans le scénario prix, la mesure prise n'est incitative qu'à partir d'un prix de l'eau très élevé (x7). Cependant, les deux scénarios conduiraient à une chute de revenu inévitable plus marquée dans le scénario prix.

Ces conclusions concernent, comme il a été souligné plus haut, un seul type d'exploitation : GC-Betterave localisé dans la zone n°5, pour compléter les résultats développés dans ce document, il serait donc utile d'appliquer le même raisonnement aux autres types d'exploitations et aux autres zones de la Beauce.

# Bibliographie

1. **Agence de l'Eau Loire-Bretagne (2003).** *État des lieux Bassin Loire-Bretagne. Tome 1. Caractérisation du bassin.* Chapitre XI : cas particulier de la nappe de Beauce. (version de travail). [consulté le 23/04/2011]. <http://eduterre.ens-lyon.fr/eduterre-usages/nappe/html/outils/biblio/chap11.pdf>
2. **Allen L.J.S. (2003).** *An introduction to stochastic processes with applications to biology.* Upper Saddle River (NJ) : Pearson. 381 p.
3. **Benoît M. (1990).** La gestion territoriale de l'activité agricole dans un village lorrain. *Mappemonde*, n°4, p. 15-17.
4. **Benoît-Cattin M. (1996).** Modèles couplés. In : Reyniers F.-N., Benoit-Cattin M. (eds). *Couplage de modèles en agriculture.* Montpellier : CIRAD, p. 47-48. Actes du séminaire 14-15 juin 1995.
5. **Bercu B., Chafai D. (2007).** *Modélisation stochastique et simulation. Cours et applications.* Paris : Dunod. 352 p.
6. **Blanco Fonseca M., Jacquet F., Flichman G., Louhichi K. (2009).** *Optimisation et outils de la programmation mathématique pour la modélisation des politiques publiques.* Chapitre 3 : le risque. Cours du Master A2D2, Sup Agro, Montpellier.
7. **Bonnal L., Favard P. (2000).** Prévisions de court terme du niveau des aquifères : le cas de la nappe de Beauce. *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales*, n° 53, p. 76-91
8. **Boussard J.M. (1970).** *Programmation mathématique et théorie de la production agricole.* Paris : Cujas.
9. **Boussard J.M. (1987).** *Economie de l'agriculture.* Paris : Economica, 319 p.
10. **Boussard J.M., Daudin J.J. (1988).** *La programmation linéaire dans les modèles de production.* Paris : Masson, 127 p. (Actualités scientifiques et agronomiques de l'INRA ; 14).
11. **Boussard J-M., Boussemart J-P., Flichman G., Jacquet F., Lefer H-B. (1994).** *Programme agriculture de demain : analyse des impacts socioéconomiques de différentes politiques agricoles dans certaines régions françaises.* Lille : CREA-LABORES. Rapport intermédiaire, 216 p.
12. **Brunel L., Bouarfa S., Ruelle P. (2007).** *Etude sur les conséquences de l'économie agricole régionale des contraintes en matière de gestion de l'eau : pistes de réflexion pour une priorisation des prélèvements.* Montpellier : CEMAGREF, 48 p.
13. **Brunel L., Bouarfa S., Ruelle P., Morardet S., Jean Claude Mailhol J.-C., Granier J. (2009).** *Stratégies d'adaptation des exploitations agricoles à l'évolution des règles de gestion de l'eau dans le périmètre du SAGE Nappe de Beauce et impacts économiques.* Montpellier : CEMAGREF, 80 p.
14. **Buisson (2010).** *Diagnostic territorial (SIG) de l'agriculture sur la zone d'influence de la nappe de Beauce.* Mémoire d'ingénieur : SupAgro Montpellier, 59 p.

15. **Carpy-Goulard (2001).** *Analyse des relations agriculture-environnement par couplage d'un modèle économique à des indicateurs environnementaux : application au secteur des grandes-cultures de la région Midi-Pyrénées.* Thèse Doctorat : Université Montpellier I, 324 p.
16. **CEMAGREF (2004).** *Les structures tarifaires des petits réseaux collectifs d'irrigation : méthodologie et test sur le Bassin Loire-Bretagne I. Enquête par sondage.* Montpellier : CEMAGREF, 32 p.
17. **Chahinian N. (2004).** *Paramétrisation multi-critère et multi-échelle d'un modèle hydrologique spatialisé de crue en milieu agricole.* Thèse Doctorat : Montpellier II, 264 p.
18. **CLE (2010).** Spécial "La CLE adopte son projet du SAGE nappe de Beauce". *La lettre du SAGE nappe de Beauce*, n° 9, 5 p. [consulté le 02/12/2011]. [http://www.pays-du-pithiverais.fr/fic\\_bdd/mag\\_pdf\\_fr\\_fichier/12928458300\\_Lettre\\_du\\_SAGE\\_N-9-VF.pdf](http://www.pays-du-pithiverais.fr/fic_bdd/mag_pdf_fr_fichier/12928458300_Lettre_du_SAGE_N-9-VF.pdf)
19. **Flichman G., Jacquet F. (2000a).** *Le couplage des modèles agronomiques (bio-techniques) et économiques : acquis et perspectives.* Communication au Séminaire en économie de la production du département ESR/INRA, Paris, 28 et 29 novembre 2000. 17 p.
20. **Flichman G., Jacquet F. (2000b).** *Le couplage des modèles agronomiques et économiques : intérêts, limites et perspectives.* Communication au Séminaire en économie de la production du département ESR/INRA, Paris, 28 et 29 novembre 2000. 22 p.
21. **Flichman G., Jacquet F. (2003).** Le couplage des modèles agronomiques et économiques : intérêt pour l'analyse des politiques. *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales*, n°67, p. 52-69.
22. **Flichman G. (1997).** Bio-economic models integrating agronomic, environmental and economic issues with agricultural use of water. In : Dupuis B. (ed.). *Aspects économiques de la gestion de l'eau dans le bassin méditerranéen : Actes de l'atelier de Marrakech du 17-19/05/1997.* Bari (Italie) : CIHEAM, p. 327-336 (Options Méditerranéennes : Série A, n°31).
23. **FNE (2008).** *La gestion de l'eau en France.* 27 p. [consulté le 02/04/2012]. [http://eau.fne.asso.fr/documents/publi-et-outils/Dossier\\_GestionEauFrance.pdf](http://eau.fne.asso.fr/documents/publi-et-outils/Dossier_GestionEauFrance.pdf)
24. **Gleyses G. (1998).** *La tarification de l'eau dans les réseaux collectifs d'irrigation en France : Résultats d'une enquête auprès d'associations d'irrigants et de syndicats de collectivités territoriales.* Montpellier : CEMAGREF, 23 p.
25. **Gleyses G. (2006).** *Mise en œuvre de la PAC : impact de la réforme de juin 2003 sur la demande en eau d'irrigation.* Montpellier : CEMAGREF, 60 p. Rapport final, Série G-EAU,
26. **González Camacho J.M., Mailhol J.C., Granier J., Ruelle P., Brunel L., Lajonquière Y. de, (2008).** *PILOTE-REG : Une approche opérationnelle pour estimer la demande en eau régionale avec les acteurs. Application au cas de la vallée de la Drôme.* [http://www.iwra.org/congress/2008/ressource/authors/abs657\\_article.pdf](http://www.iwra.org/congress/2008/ressource/authors/abs657_article.pdf)
27. **Hazell P. B.R., Norton R. D. (1986).** *Mathematical programming for economic analysis in agriculture.* New York : Macmillan. 350 p.
28. **Houet T., Hubert-Moy L., Tissot C. (2008).** Modélisation prospective spatialisée à l'échelle locale : approche méthodologique : Application à la gestion de l'eau en Bretagne. *Revue Internationale de Géomatique*, vol. 18, n° 3, p. 345-373.
29. **Jabbour B. (2008).** *Evaluation du bilan hydrique parcellaire en vue d'une gestion de l'eau : essai de régionalisation et d'application à la gestion durable de la nappe : cas de la Beauce.* Thèse Doctorat : AgroParisTech, 204 p.

30. **Janssen S., Van Ittersum M.K. (2007).** Assessing farm innovations and responses to policies: A review of bio-economic farm models. *Agricultural Systems*, n° 94, p. 622–636.
31. **Joliveau T. (2001).** *Informatique et paysage : support de formation*. ENGREF, CRENAM /UMR CNRS 5600, Université de Saint-Etienne. [Consulté le 16/04/2011]. <http://dossier.univ-stetienne.fr/crenam/www/formationpaysage/index.html>
32. **Le Mat O., Loubier S. et al. (2008).** *Scenarios of water demand management : impacts at regional level. Case study report: The Boutonne River Basin (France)*. European Commission DG Environment Project (contract ENV.D.2/ETU/2007/00097r). 56 p.
33. **Loubier S., Moreau (2007).** *Impacts des politiques publiques et du choix de tarification sur la demande en eau au sein de réseaux collectifs d'irrigation: application à une Association Syndicale Autorisée du Tarn. Rapport final*. Montpellier : CEMAGREF UMR G-EAU, 34 p.
34. **Loubier S. (2010).** *Des instruments de gestion pour économiser l'eau d'irrigation aux instruments pour assurer l'équilibre prélèvements-ressources*. Montpellier : CEMAGREF, 8 p.
35. **Louhichi K., Flichman G., Zekri S. (1999).** Un modèle bio-économique pour analyser l'impact de la politique de conservation des eaux et du sol. *Économie rurale*, n° 252, p. 55-64.
36. **Mailhol J.C., Revol P., Ruelle P. (1996).** *Pilote : un modèle opérationnel pour déceler l'apparition de stress hydriques*. ICID 16th international congress on irrigation and drainage : workhop on crop-water-environment models, Cairo, 17 septembre 1996.
37. **Michelin Y. (2000).** Le bloc-diagramme: une clé de compréhension des représentations du paysage chez les agriculteurs? Mise au point d'une méthode d'enquête préalable à une gestion concertée du paysage en Artense (massif central français). *Cybergéo [En ligne]*, n° 118. 11 p. [Consulté le 15/04/2010]. <http://cybergeo.revues.org/1992>
38. **Montginoul M., Strosser P. (1999).** Analyser l'impact des marchés de l'eau. *Économie rurale*, n° 254, p. 20-27.
39. **Morardet S., Hanot S. (2000).** *La gestion volumétrique de l'eau en Beauce : impact sur les exploitations agricoles. Rapport final*. Montpellier : CEMAGREF. 81 p.
40. **Petit O. (2009).** Regard rétrospectif sur l'évolution de la gouvernance de l'irrigation en Beauce (1993-2008). *Sécheresse*, vol. 20, n° 3, p. 262-270.
41. **Piet L. (2002).** *Spatialisation d'un modèle d'équilibre générale pour l'étude de la localisation des activités agricoles à une échelle infra-nationale*. Thèse Doctorat : ENGREF Paris, 315 p.
42. **Rae A.N. (1971).** An empirical application and evaluation of discrete stochastic programming in farm management. *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 53, n° 4, p. 625-638.
43. **SEPIA Conseils (2003).** *SAGE nappe de Beauce et des milieux aquatiques associés. Diagnostic, Phase 2*. Paris : SEPIA Conseils, 60 p.
44. **UNEP (2003).** *Les eaux souterraines et leur vulnérabilité : une évaluation globale du problème et des options de gestion*. [consulté le 02/04/2012]. [http://www.notre-planete.info/actualites/actu\\_204\\_rapport\\_gestion\\_nappes\\_eau.php](http://www.notre-planete.info/actualites/actu_204_rapport_gestion_nappes_eau.php)
45. **Van Ittersum M.K., Rabbinge R., Van Latesteijn H.C. (1998).** Exploratory land use studies and their role in strategic policy making. *Agricultural Systems*, n° 58, p. 309–330.

46. **Vidal A., Belouze P., Laloux S., Lepoutre D. (1997).** Gestion de l'eau et intégration de données spatialisées. *Ingénieries-EAT*, n°10, p. 65-78.
47. **Weersink A., Jeffrey S., Pannell D. (2004).** Farm-level modelling for bigger issues. *Economics & Social Sciences: Applied Economic Perspectives and Policy*, vol. 24, n° 1, p. 123–140. [consulté le 08/04/2011]. <http://aepp.oxfordjournals.org/content/24/1/123.short>

### **Références issues de la profession agricole**

1. **DDAF Eure-et-Loir (2011).** Gestion de la nappe de Beauce - Département d'Eure-et-Loir, Coefficients de nappe entre 2000 et 2011. Données de la DDAF sur Excel.
2. **Fiches cas type ROSACE (2011).** Chambre d'Agriculture de la Région d'Eure-et-Loir. Données de la CA d'Eure-et-Loir sur Excel.
3. **IRSTEA, CIRAD, DIATAE.** Rapport du comité technique du 26 mai 2011.

### **Sites internet consultés**

1. [draaf.centre.agriculture.gouv.fr](http://draaf.centre.agriculture.gouv.fr)
2. <http://eduterre.inrp.fr/eduterre-usages/nappe/html/Ressources/climat/climat.htm>
3. <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/>
4. <http://www.insee.fr>
5. [www.chambre-agriculture-28.com](http://www.chambre-agriculture-28.com)
6. [www.eau-seine-normandie.fr/fileadmin/.../sage\\_nappe\\_de\\_beauce.pdf](http://www.eau-seine-normandie.fr/fileadmin/.../sage_nappe_de_beauce.pdf)
7. [www.itbfr.org](http://www.itbfr.org)
8. [www.loiret.chambagri.fr/](http://www.loiret.chambagri.fr/)
9. [www.meteofrance.com](http://www.meteofrance.com)

## Liste des annexes

- Annexe 1 : Données ayant servi à la construction du modèle
- Annexe 2 : Détails des résultats du scénario de référence sans aucune intervention
- Annexe 3 : Scénario 1 (S1). Impact de l'augmentation du prix de l'eau sur l'assolement, le revenu et la consommation en eau
- Annexe 4 : Scénario 2 (S2). Impact de la diminution du volume de référence sur l'assolement, le revenu et la consommation en eau
- Annexe 5 : Résultats de l'ACP et de la classification hiérarchique
- Annexe 6 : Modèle d'exploitation GC-Betterave écrit sur GAMS

## Annexe 1 : Données ayant servi à la construction du modèle

**Tableau 1. Coefficients de nappe appliqués dans l'Eure-et-Loir entre 1999 et 2011 et les volumes de référence en millions de m<sup>3</sup>**

	Volume référence Beauce	Volume référence 28	Coef. réducteur 28	Coef. réducteur harmonisé base 420	
<b>1999</b>	<b>525</b>	164,4	0,8	1,00	Ancienne règle de gestion
<b>2000</b>	<b>525</b>	167	0,86	1,08	
<b>2001</b>	<b>525</b>	166,5	0,955	1,19	
<b>2002</b>	<b>525</b>	166,5	0,955	1,19	
<b>2003</b>	<b>525</b>	166,9	0,955	1,19	
<b>2004</b>	<b>525</b>	167	0,955	1,19	
<b>2005</b>	<b>525</b>	167	0,955	1,19	
<b>2006</b>	<b>525</b>	167	0,86	1,08	
<b>2007</b>	<b>525</b>	168,6	<b>0,644</b>	0,81	Nouvelle règle
<b>2008</b>	<b>525</b>	165,8	0,45	0,56	
<b>2009</b>	<b>525</b>	165,8	0,587	0,73	
<b>2010</b>	<b>420</b>	132,6	0,71	0,71	
<b>2011</b>	<b>420</b>	132,5	0,91	0,91	

*Source : DDAF Eure-et Loir, 2011.*

**Tableau 2. Les principaux paramètres utilisés dans le fichier « sol » dans Pilote**

Sols	CC	PF P	RFU/R U	K évaporation	CoefRevap	RatioResIni	Profondeur
superficiels S1	0,3	0,2	0	0,3	0	0,7	0,5
moyen S2	0,3	0,2	0	0,3	0	0,7	0,7
profond S3	0,3	0,2	0	0,3	0	0,7	1,1

*Source : Buisson (2010) à partir des données du RRP*

**Tableau 3. Les principaux paramètres utilisés dans le fichier « plante » dans Pilote**

	<b>BTh</b>	<b>BDh</b>	<b>Orgeh</b>	<b>Orgeb</b>	<b>POISp</b>	<b>Col</b>	<b>maïs</b>	<b>Bsucre</b>
Profondeur racinaire (m)	1,2	1,2	1,2	1,2	0,7	1,2	1,2	1,2
Rfu/Ru	0,65	0,66	0,65	0,67	0,66	0,65	0,65	0,66
Accroissement racinaire (m/j)	0,01	0,0075	0,01	0,01	0,015	0,008	0,016	0,01
durée d'installation des racines (jrs)	30	30	30	10	10	10	10	20
Kc max	1,15	1,15	1,15	1,15	1,15	1,1	1,2	1,05
Coef. Max d'évaporation	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
Coef. D'aversion au stress hydrique	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	1,25	2
Densité plante réelle	300	300	300	300	90	50	8	10
Densité plante optimale	300	300	300	300	90	50	8	10
Humidité grain (%)	15	15	15	15	15	9	15	63
Efficience de conversion	1	1	1	1	0,8	0,7	1,35	3
Indice de récolte potentiel	0,5	0,47	0,5	0,5	0,5	0,4	0,5	0,64
Seuil du LAI pour stress hydrique	3	2,5	3	2,5	3,5	4,5	2,5	2
Coef. De décroissance de l'indice de récolte	0,12	0,12	0,12	0,12	-0,05	0,12	0,12	0,2
Seuil début phase critique (t°)	1200	700	1200	600	700	1400	700	850
Fin phase critique (t°)	2350	1900	2350	1600	1100	2400	1500	2300
Température de floraison (= LAI max)	1600	1200	1600	1000	815	3800	800	1700
Température de maturité	2600	2200	2600	1900	1800	3000	1650	2800
Température d'émergence	100	100	100	100	100	100	100	150
Température de base	0	0	0	0	0	0	6	0
LAI max	6	5	6	5	4,5	6	4,5	4
Coef. forme LAI alpha	1,8	1,8	1,8	2,5	1,2	1,2	4	2,6
Coef. forme LAI beta	2,3	2,3	2,3	1,1	1	3,3	1	2,4
Coef. forme LAI gamma	5,3	5,3	5,3	2,5	3,5	5,5	2,3	1,7

*Source : Données calées sur la Beauce à partir des ateliers participatifs de 2009*

**BTh** : blé tendre d'hiver, **BDh** : blé dur d'hiver, **Orgeh** : orge d'hiver, **Orgeb** : orge de brasserie, **POISp** : pois protéagineux, **Col** : colza, **Bsucre** : Betterave à sucre

**Tableau 4. Informations relatives aux stations météo entrées dans le fichier « météo » dans Pilote**

Station	Altitude	Latitude	Longitude
Viabon	135	48°12'59" N	01°42'19" E
Verdes	120	47°57'32" N	01°25'44" E
Orléans	110	47°54'14" N	01°54'26" E
Fontainebleau	80	48°24'29" N	02°41'58" E
Gironville	105	48°11'09" N	02°31'43" E

Source : Météo France

**Tableau 5. Données économiques introduites dans GAMS**

	Charges opérationnelles	Prix de vente	Primes spécifiques	DPU €/ha
BTh	398	18	89,6	
BDh	496	29,3	89,6	
orgeh	402	18,2	89,6	
Orgeb	363	25,8	110,8	
POISp	362	21,1	110,8	
col	488	27,8	89,6	203
BtB	398	18	89,6	
Bd0	496	24	89,6	
OrgB0	363	23	110,8	
maïs	676	14,3	110,8	
Bsucre	840	2,6	0	
Beth	840	2,15	0	

Source : INSEE OU Agreste (2007) et enquêtes (2007)

**BTh** : blé tendre d'hiver, **BDh** : blé dur d'hiver, **Orgeh** : orge d'hiver, **Orgeb** : orge de brasserie, **POISp** : pois protéagineux, **Col** : colza, **BtB** : blé de blé, **Bd0** : blé dur rémunéré à un prix bas, **OrgB0** : orge de brasserie rémunéré à un prix bas **Bsucre** : Betterave à sucre, **Beth** : betterave éthanol.

**Tableau 6. Valeurs des doses d'irrigations obtenues comme résultats des simulations avec Pilote par culture, type de sol, type d'année et avec les différentes stratégies d'irrigation appliquées**

Activités	PS ou ES	PM ou EM	PH ou EH	Activités	PS ou ES	PM ou EM	PH ou EH
BTh.S1.D0	0	0	0	POISp.S1.D0	0	0	0
BTh.S1.D1	300	300	300	POISp.S1.D1	300	300	300
BTh.S1.D2	600	600	600	POISp.S1.D2	600	600	
BTh.S1.D3	900	900		POISp.S1.D3	900		
BTh.S1.D4	1200			POISp.S1.D4			
BTh.S2.D0	0	0	0	POISp.S2.D0	0	0	0
BTh.S2.D1	350	350	350	POISp.S2.D1	300	300	300
BTh.S2.D2	700	700		POISp.S2.D2	600	600	
BTh.S2.D3	1050			POISp.S2.D3	900		
BTh.S2.D4				POISp.S2.D4			
BTh.S3.D0	0	0	0	POISp.S3.D0	0	0	0
BTh.S3.D1	400	400	400	POISp.S3.D1	300	300	300
BTh.S3.D2	800			POISp.S3.D2	600	600	
BTh.S3.D3				POISp.S3.D3	900		
BTh.S3.D4				POISp.S3.D4			
BDh.S1.D0	0	0	0	mais. S1.D0	0	0	0
BDh.S1.D1	300	300	300	mais. S1.D1	1200	750	600
BDh.S1.D2	600	600	600	mais. S1.D2	1500	1050	900
BDh.S1.D3	900	900		mais. S1.D3	1800	1350	
BDh.S1.D4	1200			mais. S1.D4	2100		
BDh.S2.D0	0	0	0	mais. S2.D0	0	0	0
BDh.S2.D1	350	350	350	mais. S2.D1	900	450	300

<b>BDh.S2.D2</b>	700	700		mais. S2.D2	1200	750	600
<b>BDh.S2.D3</b>	1050			mais. S2.D3	1500	1200	
<b>BDh.S2.D4</b>				mais. S2.D4	1800	1500	
<b>BDh.S3.D0</b>	0	0	0	mais. S3.D0	0	0	0
<b>BDh.S3.D1</b>	400	400	400	mais. S3.D1	700	525	350
<b>BDh.S3.D2</b>	800	800		mais. S3.D2	1050	950	
<b>BDh.S3.D3</b>	1200			mais. S3.D3	1400		
<b>BDh.S3.D4</b>				mais. S3.D4			
<b>Orgeb.S1.D0</b>	0	0	0	Bsucre.S1.D0	0	0	0
<b>Orgeb.S1.D1</b>	300	300	300	Bsucre.S1.D1	1200	600	300
<b>Orgeb.S1.D2</b>	600	600	600	Bsucre.S1.D2	1500	900	600
<b>Orgeb.S1.D3</b>	900	900	900	Bsucre.S1.D3	1800	1200	900
<b>Orgeb.S1.D4</b>				Bsucre.S1.D4	2100	1500	
<b>Orgeb.S2.D0</b>	0	0	0	Bsucre.S2.D0	0	0	0
<b>Orgeb.S2.D1</b>	350	350	350	Bsucre.S2.D1	1200	600	300
<b>Orgeb.S2.D2</b>	700	700	700	Bsucre.S2.D2	1500	900	600
<b>Orgeb.S2.D3</b>	1050			Bsucre.S2.D3	1800	1200	
<b>Orgeb.S2.D4</b>				Bsucre.S2.D4			
<b>Orgeb.S3.D0</b>	0	0	0	Bsucre.S3.D0	0	0	0
<b>Orgeb.S3.D1</b>	400	400	400	Bsucre.S3.D1	1050	350	350
<b>Orgeb.S3.D2</b>	800			Bsucre.S3.D2	1400	700	
<b>Orgeb.S3.D3</b>				Bsucre.S3.D3	1750	1050	
<b>Orgeb.S3.D4</b>				Bsucre.S3.D4			

**BTh** : blé tendre d'hiver, **BDh** : blé dur d'hiver, **Orgeh** : orge d'hiver, **Orgeb** : orge de brasserie, **POISp** : pois protéagineux, **Col** : colza, **BtB** : blé de blé, **Bd0** : blé dur rémunéré à un prix bas, **Orgeb0** : orge de brasserie rémunéré à un prix bas, **Bsucre** : Betterave à sucre, **Beth** : betterave éthanol.

**PS** : printemps sec, **ES** : été sec, **PM** : printemps moyen, **EM** : été moyen, **PH** : printemps humide, **EH** : été humide.

**S1**: sols superficiels, **S2**: sols moyens, **S3**: sols profonds.

**Tableau 7.** Valeurs des rendements obtenues comme résultats des simulations avec Pilote par culture, type de sol, type d'année et avec les différentes stratégies d'irrigation appliquées et doses appliquées

Activités	PS ou ES	PM ou EM	PH ou EH	Activités	PS ou ES	PM ou EM	PH ou EH
<b>BTh.S1.D0</b>	24	47	59	Col.S1.D0	28	30	32
<b>BTh.S1.D1</b>	48	63	72	Col.S2.D0	30	32	34
<b>BTh.S1.D2</b>	65	77	85	Col.S3.D0	34	36	38
<b>BTh.S1.D3</b>	76	85					
<b>BTh.S1.D4</b>	85			BtB.S1.D0	19	42	54
<b>BTh.S2.D0</b>	46	67	80	BtB.S1.D1	43	58	67
<b>BTh.S2.D1</b>	58	80	92	BtB.S1.D2	60	72	80
<b>BTh.S2.D2</b>	79	88		BtB.S1.D3	71	80	
<b>BTh.S2.D3</b>	85			BtB.S1.D4	80		
<b>BTh.S2.D4</b>				BtB.S2.D0	41	62	75
<b>BTh.S3.D0</b>	60	79	88	BtB.S2.D1	53	75	87
<b>BTh.S3.D1</b>	79	87	94	BtB.S2.D2	74	83	
<b>BTh.S3.D2</b>	89			BtB.S2.D3	80		
<b>BTh.S3.D3</b>				BtB.S2.D4			
<b>BTh.S3.D4</b>				BtB.S3.D0	65	74	83
				BtB.S3.D1	74	82	89
<b>BDh.S1.D0</b>	31	52	62	BtB.S3.D2	84		
<b>BDh.S1.D1</b>	48	61	70	BtB.S3.D3			
<b>BDh.S1.D2</b>	64	72	80	BtB.S3.D4			
<b>BDh.S1.D3</b>	69	80					
<b>BDh.S1.D4</b>	75			mais. S1.D0	10	31	62
<b>BDh.S2.D0</b>	41	55	62	mais. S1.D1	53	59	95
<b>BDh.S2.D1</b>	60	70	82	mais. S1.D2	77	74	109

<b>BDh.S2.D2</b>	70	80		mais. S1.D3	97	108	
<b>BDh.S2.D3</b>	77			mais. S1.D4	109		
<b>BDh.S2.D4</b>				mais. S2.D0	17	35	70
<b>BDh.S3.D0</b>	50	70	75	mais. S2.D1	62	56	88
<b>BDh.S3.D1</b>	67	80	85	mais. S2.D2	79	69	115
<b>BDh.S3.D2</b>	75	85		mais. S2.D3	98	103	
<b>BDh.S3.D3</b>	80			mais. S2.D4	112	111	
<b>BDh.S3.D4</b>				mais. S3.D0	32	45	107
				mais. S3.D1	73	95	115
<b>Orgeb.S1.D0</b>	23	41	41	mais. S3.D2	93	112	
<b>Orgeb.S1.D1</b>	39	55	55	mais. S3.D3	110		
<b>Orgeb.S1.D2</b>	55	62	65	mais. S3.D4			
<b>Orgeb.S1.D3</b>	67	73	73				
<b>Orgeb.S1.D4</b>				Bsucre.S1.D0	110	320	440
<b>Orgeb.S2.D0</b>	36	54	55	Bsucre.S1.D1	500	560	700
<b>Orgeb.S2.D1</b>	57	66	67	Bsucre.S1.D2	610	680	830
<b>Orgeb.S2.D2</b>	67	75	76	Bsucre.S1.D3	750	810	950
<b>Orgeb.S2.D3</b>	75			Bsucre.S1.D4	820	900	
<b>Orgeb.S2.D4</b>				Bsucre.S2.D0	170	380	490
<b>Orgeb.S3.D0</b>	49	51	61	Bsucre.S2.D1	600	600	750
<b>Orgeb.S3.D1</b>	64	72	73	Bsucre.S2.D2	700	760	950
<b>Orgeb.S3.D2</b>	74			Bsucre.S2.D3	820	850	
<b>Orgeb.S3.D3</b>				Bsucre.S2.D4			
<b>Orgeb.S3.D4</b>				Bsucre.S3.D0	240	500	780
				Bsucre.S3.D1	650	660	950
<b>POISp.S1.D0</b>	30	34	38	Bsucre.S3.D2	800	790	
<b>POISp.S1.D1</b>	37	40	45	Bsucre.S3.D3	890	900	
<b>POISp.S1.D2</b>	42	46		Bsucre.S3.D4			
<b>POISp.S1.D3</b>	48						
<b>POISp.S1.D4</b>							

<b>POISp.S2.D0</b>	30	34	38
<b>POISp.S2.D1</b>	37	40	45
<b>POISp.S2.D2</b>	42	46	
<b>POISp.S2.D3</b>	48		
<b>POISp.S2.D4</b>			
<b>POISp.S3.D0</b>	30	34	38
<b>POISp.S3.D1</b>	37	40	45
<b>POISp.S3.D2</b>	42	46	
<b>POISp.S3.D3</b>	48		
<b>POISp.S3.D4</b>			

**BTh** : blé tendre d'hiver, **BDh** : blé dur d'hiver, **Orgeh** : orge d'hiver, **Orgeb** : orge de brasserie, **POISp** : pois protéagineux, **Col** : colza, **BtB** : blé de blé, **Bsucre** : Betterave à sucre, **Beth** : betterave éthanol.

**PS** : printemps sec, **ES** : été sec, **PM** : printemps moyen, **EM** : été moyen, **PH** : printemps humide, **EH** : été humide.

**S1**: sols superficiels, **S2**: sols moyens, **S3**: sols profonds.

## Annexe 2 : Détails des résultats du scénario de référence sans aucune intervention

**Tableau 1. Marge brute espérée hors DPU, par culture**

Cultures	MB espérée
BTh	9 146
<b>BDh</b>	<b>15 796</b>
orgeh	9 244
<b>Orgeb</b>	<b>12 002</b>
POISp	5 176
col	1 529
BtB	7 529
Bd0	<b>11 265</b>
OrgB0	9 374
maïs	5 788
<b>Bsucre</b>	<b>10 296</b>
Beth	6 618

**BTh** : blé tendre d'hiver, **BDh** : blé dur d'hiver, **Orgeh** : orge d'hiver, **Orgeb** : orge de brasserie, **POISp** : pois protéagineux, **Col** : colza, **BtB** : blé de blé, **Bd0** : blé dur rémunéré à un prix bas, **OrgB0** : orge de brasserie rémunéré à un prix bas, **Bsucre** : Betterave à sucre, **Beth** : betterave éthanol.

**Tableau 2. Marge brute espérée des activités retenues, hors DPU, par culture et par type de sol**

	S1	S2	S3
BDh	8 961		6 978
Orgeb		28 151	
POISp		4 251	
BtB	773	21 661	12 842
Bd0			9 681
maïs	280	3 358	
Bsucre	4 501	7 166	10 149
Beth			3 668

**BDh** : blé dur d'hiver, **Orgeb** : orge de brasserie, **POISp** : pois protéagineux, **Col** : colza, **BtB** : blé de blé, **Bd0** : blé dur rémunéré à un prix bas, **Bsucre** : Betterave à sucre, **Beth** : betterave éthanol.

**S1**: sols superficiels, **S2**: sols moyens, **S3**: sols profonds.

**Tableau 3. Doses choisies dans le scénario de référence, par culture, par type de sol et selon le type de l'année climatique**

Types de sols	cultures	Saison humide		Saison moyenne		Saison sèche	
		DOS E	Surface (ha)	DOSE	Surface (ha)	DOS E	Surface (ha)
<b>Superficiels</b>	BDh	D2	5,00	D3	5,00	D2	5,00
	POISp	D1	1,25	D2	1,25	D0	1,25
	col						
	Bd0						
	maïs	D2	0,45	D3	0,45	D0	0,45
	Bsucre	D3	3,30	D4	3,30	D3	3,30
<b>Moyens</b>	BDh						
	Orgeb	D2	17,11	D2	17,11	D3	17,11
	POISp	D1	6,88	D2	6,88	D0	6,88
	col						
	BtB	D1	20,78	D2	20,78	D2	20,78
	Bd0						
	maïs	D2	4,90	D4	4,90	D0	4,90
	Bsucre	D2	5,33	D3	5,33	D3	5,33
<b>Profonds</b>	BDh	D1 et	2,68 avec D1 et 0,96 avec D0	D1 et D2	1,91 avec D1 et 1,73 avec D2	D1 et	0,94 avec D1 et 2,7 avec D2
	BtB	D1	13,47	D0	13,47	D0	13,47
	Bd0	D1	7,11	D1	7,11	D1	7,11
	maïs						
	Bsucre	D1	7,15	D3	7,15	D2	7,15
	Beth	D1	3,60	D3	3,60	D2	3,60

**BDh** : blé dur d'hiver, **Orgeb** : orge de brasserie, **POISp** : pois protéagineux, **Col** : colza, **BtB** : blé de blé, **Bd0** : blé dur rémunéré à un prix bas, **Bsucre** : Betterave à sucre, **Beth** : betterave éthanol.

**Tableau 4. Revenu total, et contribution de chaque culture au revenu**

Activités	BDh	Orgeb	POISp	BtB	Bd0	maïs	Bsucre	Beth
<b>Revenu total/culture</b>	15	28	5 024	34 504	9 681	3 638	21 816	3 668
<b>Revenu hors DPU (€)</b>					122 421			
<b>DPU (€/ha)</b>					20 300			
<b>Revenu total (€)</b>					142 721			

**BDh** : blé dur d'hiver, **Orgeb** : orge de brasserie, **POISp** : pois protéagineux, **Col** : colza, **BtB** : blé de blé, **Bd0** : blé dur rémunéré à un prix bas, **Bsucre** : Betterave à sucre, **Beth** : betterave éthanol.

### Annexe 3 : Scénario 1 (S1). Impact de l'augmentation du prix de l'eau sur l'assolement, le revenu et la consommation en eau

Tableau 1. Superficie irriguée en ha, par type d'années climatiques selon les différents niveaux du prix de l'eau

	<b>S0=PE*1</b>	<b>PE*2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>10</b>
<b>ps*es</b>	73,0	72,5	73,6	78,6	78,6	71,4	70,1	67,4	50,7	48,3
<b>ps*em</b>	78,4	77,8	78,7	82,6	78,6	71,4	70,1	67,4	50,7	48,3
<b>ps*eh</b>	78,4	77,8	78,7	82,6	78,6	70,7	69,5	61,6	50,7	48,3
<b>pm*es</b>	81,2	83,4	84,5	89,5	89,5	82,3	71,4	67,4	50,7	48,3
<b>pm*em</b>	86,5	88,7	89,6	93,5	89,5	82,3	71,4	67,4	50,7	48,3
<b>pm*eh</b>	86,5	88,7	89,6	93,5	89,5	81,6	70,7	61,6	50,7	48,3
<b>ph*es</b>	<b>93,7</b>	92,8	91,8	88,4	84,9	77,6	69,8	67,2	49,8	47,5
<b>ph*em</b>	<b>99,0</b>	98,1	96,9	92,4	84,9	77,6	69,8	67,2	49,8	47,5
<b>ph*eh</b>	<b>99,0</b>	98,1	96,9	92,4	84,9	76,9	69,1	61,4	49,8	47,5

PS : printemps sec, ES : été sec, PM : printemps moyen, EM : été moyen, PH : printemps humide, EH : été humide.

**Tableau 2. Ajustement des doses et des surfaces selon les différents niveaux du prix de l'eau, pour différents états climatiques en m<sup>3</sup> (ABS= Absence).**

Cultures	Types de saisons	Types de sols	S0=PE*1 et Vréf= 71,5	PE*2	3	4	5	6	7	8	9	10	
BDh	humide	superficiels	5 ha avec D2							Surf -	Surf-, en sec	Surf-, en sec	
		moyens	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	
		profonds	2 ha avec D1								Surf-, Doses-	ABS	ABS
	moyenne	superficiels	5 ha avec D3								Surf -	Surf-, Doses -	Surf-, Doses -
		moyens	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +
		profonds	2 ha avec D1	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf -	Surf -	ABS	ABS	ABS
	Saison sèche	superficiels	5 ha avec D2								Surf-, Doses +	Surf-, Doses +	Surf -
		moyens	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +
		profonds	2 ha avec D2	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf -	Surf -	ABS	ABS	ABS
Bd0	humide	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	Surf +	Surf +	Surf +	
		moyens	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	Surf +	
		profonds	7 ha avec D1	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	ABS	ABS	
	moyenne	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	Surf +	Surf +	Surf +	
		moyens	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	Surf +	
		profonds	7 ha avec D1	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	ABS	ABS	
	sèche	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	Surf +	Surf +	Surf +	
		moyens	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	Surf +	
		profonds	7 ha avec D1	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	ABS	ABS	
BtB	humide	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	
		moyens	20 ha avec D1							Surf -	Surf -	Surf -	ABS
		profonds	13 ha avec D1		Surf -	Surf -, Doses -	Surf -, Doses -	Surf -, Doses -	Surf -, Doses -	Surf -, Doses -	Surf -, Doses -	Surf ++, Doses -	Surf ++, Doses -
	moyenne	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	20 ha avec D2							Surf -	Surf -, Doses -	Surf -, Doses -	ABS
		profonds	13 ha en sec	Doses +	Doses +	Surf -, en sec	Surf -, en sec	Surf ++, en sec	Surf ++, en sec				
	sèche	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	20 ha avec D2							Surf -	Surf -	Surf -	ABS
		profonds	13 ha en sec		Surf -	Surf -	Surf -	Surf -	Surf -	Surf -	Surf -	Surf ++	Surf ++
Orgeb	humide	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	
		moyens	17 ha avec D2							Doses -	Doses -	Doses -	Doses -
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
	moyenne	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	17 ha avec D2										
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
	sèche	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	17 ha avec D3										
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
POISp	humide	superficiels	1 ha avec D1									Dose -(en sec)	Dose -(en sec)
		moyens	6 ha avec D1						ABS	ABS	ABS	ABS	
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS

	moyenne	superficiels	1 ha avec D2							Dose -(en sec)	Dose -(en sec)	Dose -(en sec)	
		moyens	6 ha avec D2							ABS	ABS	ABS	ABS
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	
	sèche	superficiels	1 ha avec D0										
		moyens	6 ha avec D0							ABS	ABS	ABS	ABS
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	
Col	humide	superficiels	ABS				Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +
		moyens	ABS			Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
	moyenne	superficiels	ABS				Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +
		moyens	ABS			Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
	sèche	superficiels	ABS				Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +
		moyens	ABS			Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
maïs	humide	superficiels	0,45 ha avec D3				ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	5 ha avec D2				ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		profonds	ABS	ABS	ABS	Surf +	Surf +	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
	moyenne	superficiels	0,45 ha avec D2				ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	5 ha avec D4				ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		profonds	ABS	ABS	ABS	Surf +	Surf +	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
	sèche	superficiels	0,45 ha avec D0				ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	5 ha avec D0				ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		profonds	ABS	ABS	ABS	Surf +	Surf +	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
Bsucre	humide	superficiels	3 ha avec D3					Doses -	Doses -	Surf -, Doses -	Surf -, Doses -	Surf -, Doses -	
		moyens	5 ha avec D2				Surf -	Surf -	Surf -	Surf -	Surf -	Surf +	Surf +
		profonds	7 ha avec D1			Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +, Doses	ABS	ABS
	moyenne	superficiels	3 ha avec D4							Surf -	Surf -	Surf -	
		moyens	5 ha avec D3				Surf -	Surf -	Surf -	Surf -	Surf -	Surf +	Surf +
		profonds	7 ha avec D3			Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	Surf +	ABS	ABS
	sèche	superficiels	3 ha avec D3						Surf -, Doses -				
		moyens	5 ha avec D3				Surf -	Surf -	Surf -	Surf -	Surf -	Surf +	Surf +
		profonds	7 ha avec D2			Surf +	Surf +	Surf +	Surf +, Doses	Surf +, Doses	Surf +, Doses	ABS	ABS
Beth	humide	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	
		moyens	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	
		profonds	3 ha avec D1				ABS	ABS	Surf ---	ABS	ABS	ABS	ABS
	moyenne	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		profonds	3 ha avec D3				ABS	ABS	Surf ---	ABS	ABS	ABS	ABS
	sèche	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		profonds	3 ha avec D2				ABS	ABS	Surf ---	ABS	ABS	ABS	ABS

■ : Pas de changements.

**BDh** : blé dur d'hiver, **Orgb** : orge de brasserie, **POISp** : pois protéagineux, **Col** : colza, **BtB** : blé de blé, **Bd0** : blé dur rémunéré à un prix bas, **Bsucre** : Betterave à sucre, **Beth** : betterave éthanol.

**Tableau 3. Evolution de la consommation totale moyenne, et par type d'années climatiques selon les différents niveaux du prix de l'eau en m<sup>3</sup>**

	S0=PE*1	PE*2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>ps*es</b>	<b>71 500</b>	61 971	59 731							
<b>ps*em</b>	<b>71 500</b>	<b>71 500</b>	<b>71 500</b>	<b>71 500</b>	65 485	61 225	60 281	60 180	52 427	50 223
<b>ps*eh</b>	54 177	54 387	54 441	54 753	52 347	47 678	46 856	46 570	42 612	40 581
<b>pm*es</b>	<b>71 500</b>	66 227	58 422	52 519	52 408					
<b>pm*em</b>	<b>71 500</b>	<b>71 500</b>	<b>71 500</b>	<b>71 500</b>	65 485	61 225	55 008	47 102	42 974	42 901
<b>pm*eh</b>	54 177	54 387	54 441	54 753	52 347	47 678	41 583	33 491	33 160	33 258
<b>ph*es</b>	64 603	64 040	63 184	59 838	58 424	58 424	56 224	54 714	47 064	46 151
<b>ph*em</b>	64 603	64 040	63 184	59 838	52 410	48 149	45 005	43 394	37 519	36 643
<b>ph*eh</b>	47 280	46 927	46 125	43 090	39 271	34 602	31 580	29 783	27 704	27 000
Consommation totale moyenne	66 172	66 094	65 917	65 250	61 042	57 628	53 482	48 659	43 794	43 105
% de baisse	0	0,12	0,38	1	8	13	19	26	34	35

PS : printemps sec, ES : été sec, PM : printemps moyen, EM : été moyen, PH : printemps humide, EH : été humide.

**Tableau 4. Evolution de l'allocation du volume de référence de 71 500 m<sup>3</sup> entre les cultures selon les différents niveaux du prix de l'eau, pour différents états climatiques en m<sup>3</sup>**

		S0=PE*1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>ps</b>	<b>BDh</b>	5 536	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 219	9 340	9 319	8 794
	<b>Orgeb</b>	17 961	17	17 961	17 961	17 961	17 961	18 200	18 200	18 200	18 200
	<b>BtB</b>	14 553	14	14 553	14 553	14 553	14 553	13 005	8 994	3 208	
	<b>Bd0</b>	2 848	2 692	3 120	4 793	4 793	3 120	3 471	4 915	2 475	4 079
<b>pm</b>	<b>BDh</b>	6 648	6 000	6 000	6 000	6 000	6 000	6 263	6 378	6 300	6 300
	<b>Orgeb</b>	11 974	11	11 974	11 974	11 974	11 974	12 133	12 133	12 133	12 133
	<b>POISp</b>	4 875	4 875	4 875	4 875	4 875	4 875	750			
	<b>BtB</b>	14 553	15	15 664	15 664	15 664	15 664	13 005	4 497	1 604	
	<b>Bd0</b>	2 848	2 692	3 120	4 793	4 793	3 120	3 471	5 362	3 713	5 317
<b>ph</b>	<b>BDh</b>	4 074	3 750	3 750	3 750	3 750	3 750	3 811	3 416	2 756	2 756
	<b>Orgeb</b>	11 974	11	11 974	11 974	11 974	11 974	11 459	11 459	11 459	11 459
	<b>POISp</b>	2 438	2 438	2 438	2 438	2 438	2 438	375	375		
	<b>BtB</b>	12 667	12	12 036	8 690	7 276	7 276	6 502	4 497	1 604	
	<b>Bd0</b>	2 848	2 692	3 120	4 793	4 793	3 120	3 471	4 915	2 475	3 277
<b>es</b>	<b>Mais</b>				4 392	4 392					
	<b>Bsucre</b>	25 558	25	25 149	23 801	23 801	29 640	30 605	30 052	28 769	28 658
	<b>Beth</b>	5 045	4 718	4 718			227				
<b>em</b>	<b>Mais</b>	7 956	7 885	7 618	9 989	3 974					
	<b>Bsucre</b>	18 864	18	18 710	18 205	18 205	19 421	19 386	18 732	19 224	19 151
	<b>Beth</b>	3 784	3 538	3 538			170				
<b>eh</b>	<b>Bsucre</b>	8 674	8 686	8 419	7 576	7 576	5 988	5 960	5 121	9 410	9 508
	<b>Mais</b>	3 344	3 316	3 209	3 870	1 464					
	<b>Beth</b>	1 261	1 179	1 179			57				

**BDh** : blé dur d'hiver, **Orgeb** : orge de brasserie, **POISp** : pois protéagineux, **Col** : colza, **BtB** : blé de blé, **Bd0** : blé dur rémunéré à un prix bas, **Bsucre** : Betterave à sucre, **Beth** : betterave éthanol.

PS : printemps sec, ES : été sec, PM : printemps moyen, EM : été moyen, PH : printemps humide, EH : été humide.

**Tableau 5. Evolution du revenu total moyen, du revenu par hectare et du revenu par type d'année, selon les différents niveaux du prix De l'eau, en €**

	S0=PE*1	PE*2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>ps*es</b>	120 469	116 764	112 915	109 566	108 671	106 943	103 758	100 565	97 049	93 968
<b>ps*em</b>	132 023	128 197	124 303	120 455	115 825	112 115	109 214	106 325	103 073	100 492
<b>ps*eh</b>	136 396	133 477	130 366	126 723	121 793	116 603	114 383	112 313	111 716	109 717
<b>pm*es</b>	134 337	130 543	126 750	123 600	122 929	121 186	117 627	114 435	110 716	107 864
<b>pm*em</b>	145 891	141 976	138 138	134 490	130 083	126 359	123 083	120 195	116 739	114 388
<b>pm*eh</b>	150 263	147 256	144 202	140 758	136 050	130 847	128 252	126 184	125 383	123 613
<b>ph*es</b>	140 976	137 328	133 707	130 243	130 443	130 209	126 690	123 347	120 907	118 048
<b>ph*em</b>	152 530	148 761	145 095	141 133	137 597	135 381	132 146	129 107	126 931	124 572
<b>ph*eh</b>	156 903	154 041	151 159	147 401	143 564	139 869	137 314	135 096	135 574	133 796
<b>Revenu total moyen</b>	142721	139084	135453	131847	128338	125060	121963	119155	116551	114166
<b>Revenu moyen par ha</b>	1427	1391	1355	1318	1283	1251	1220	1192	1166	1142
<b>% de baisse</b>	0	3	5	8	10	12	15	17	18	20

**PS** : printemps sec, **ES** : été sec, **PM** : printemps moyen, **EM** : été moyen, **PH** : printemps humide, **EH** : été humide.

**Tableau 6. Evolution de la contribution de chaque culture au revenu global (en %).**

	S0=PE*1	PE*2	3	4	5	6	7	8	9	10
<b>BDh</b>	13	13	13	14	14	14	14	14	14	14
<b>Orgeb</b>	23	23	23	23	23	23	24	24	23	23
<b>POISp</b>	4	4	4	4	4	4	1	1	1	1
<b>col</b>	0	0	1	3	4	4	8	9	6	8
<b>BtB</b>	28	29	27	21	21	28	26	22	38	35
<b>Bd0</b>	8	8	9	14	14	9	10	14	4	7
<b>mais</b>	3	3	3	5	3	0	0	0	0	0
<b>Bsucre</b>	18	18	17	17	17	18	17	17	13	13
<b>Beth</b>	3	3	3	0	0	0	0	0	0	0

**BDh** : blé dur d'hiver, **Orgeb** : orge de brasserie, **POISp** : pois protéagineux, **Col** : colza, **BtB** : blé de blé, **Bd0** : blé dur rémunéré à un prix bas, **Bsucre** : Betterave à sucre, **Beth** : betterave éthanol.

## Annexe 4 : Scénario 2 (S2). Impact de la diminution du volume de référence sur l'assolement, le revenu et la consommation en eau

**Tableau 1. Evolution de la superficie irriguée en ha par type d'années selon les différents niveaux du volume de référence en ha**

	<b>S0=71,5</b>	<b>60,5</b>	<b>49,5</b>	<b>33</b>	<b>22</b>
<b>ps*es</b>	73	64	62	43	38
<b>ps*em</b>	78	69	66	48	42
<b>ps*eh</b>	78	69	66	48	42
<b>pm*es</b>	81	65	65	43	38
<b>pm*em</b>	87	70	68	48	42
<b>pm*eh</b>	87	70	68	48	42
<b>ph*es</b>	94	89	78	42	34
<b>ph*em</b>	99	93	81	47	39
<b>ph*eh</b>	99	93	81	47	39

**PS** : printemps sec, **ES** : été sec, **PM** : printemps moyen, **EM** : été moyen, **PH** : printemps humide, **EH** : été humide.

**Tableau 2. Ajustement des doses et des surfaces en fonction du volume de référence, pour différents états climatiques en m<sup>3</sup>**

Culture	Type de saison	Type de sol	Base=71,5	60,5	49,5	33	22
BDh	humide	superficiels	5 ha avec D2			Doses -	Doses -
		moyens	ABS	ABS	Surf+	Surf+	Surf-
		profonds	2 ha avec D1		ABS	ABS	ABS
	moyenne	superficiels	5 ha avec D3			Doses -	Doses -
		moyens	ABS	ABS	Surf+	Surf+	Surf+, Doses -
		profonds	2 ha avec D1		ABS	ABS	ABS
	sèche	superficiels	5 ha avec D2				
		moyens	ABS	ABS	Surf+	Surf+	Surf+, Doses -
		profonds	2 ha avec D2	Surf+, Doses -	ABS	ABS	ABS
Bd0	humide	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	ABS	ABS	ABS	surf +	surf +
		profonds	7 ha avec D1	Surf-	Surf+	ABS	ABS
	moyenne	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	ABS	ABS	ABS	surf +	surf +
		profonds	7 ha avec D1	Surf-	Surf+	ABS	ABS
	sèche	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	ABS	ABS	ABS	surf +	surf +
		profonds	7 ha avec D1	Surf-	Surf+	ABS	ABS
BtB	humide	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	20 ha avec D1		surf -	ABS	ABS
		profonds	13 ha avec D1	surf +	surf -	surf ++, en	surf ++, en
	moyenne	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	20 ha avec D2		surf -	ABS	ABS
		profonds	13 ha en sec	surf +	surf -	surf ++, en	surf ++, en
	sèche	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	20 ha avec D2		surf -	ABS	ABS
		profonds	13 ha en sec	surf +	surf -	surf ++, en	surf ++, en
Orgeb	humide	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	17 ha avec D2			Doses -	Doses -
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
	moyenne	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	17 ha avec D2			Doses -	Doses -
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
	sèche	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	17 ha avec D3	meme surf, dose	meme surf, dose	ABS	ABS
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
POISp	humide	superficiels	1 ha avec D1				
		moyens	6 ha avec D1	surf -	surf -	ABS	ABS
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
	moyenne	superficiels	1 ha avec D2			Doses -	Doses -
		moyens	6 ha avec D2	surf -	surf -	ABS	ABS
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
	sèche	superficiels	1 ha avec D0				

		moyens	6 ha avec D0	surf -	surf -	ABS	ABS
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
Col	humide	superficiels	ABS	ABS	Surf+	Surf+	Surf+
		moyens	ABS	Surf+	Surf+	Surf-	Surf+
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
	moyenne	superficiels	ABS	ABS	Surf+	Surf+	Surf+
		moyens	ABS	Surf+	Surf+	Surf-	Surf+
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
	sèche	superficiels	ABS	ABS	Surf+	Surf+	Surf+
		moyens	ABS	Surf+	Surf+	Surf-	Surf+
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
mais	humide	superficiels	0,45 ha avec D2		ABS	ABS	ABS
		moyens	5 ha avec D2		ABS	ABS	ABS
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
	moyenne	superficiels	0,45 ha avec D3		ABS	ABS	ABS
		moyens	5 ha avec D4		ABS	ABS	ABS
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
	sèche	superficiels	0,45 ha avec D0		ABS	ABS	ABS
		moyens	5 ha avec D0		ABS	ABS	ABS
		profonds	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
Bsucre	humide	superficiels	3 ha avec D3			Surf-	Surf-
		moyens	5 ha avec D2	Surf+	Surf-	Surf+	Surf+
		profonds	7 ha avec D1	Surf-	Surf+	ABS	ABS
	moyenne	superficiels	3 ha avec D4			Surf-, Doses -	Surf-, Doses -
		moyens	5 ha avec D3	Surf+	Surf-	Surf+, Doses -	Surf+, Doses -
		profonds	7 ha avec D3	Surf-	Surf+	ABS	ABS
	sèche	superficiels	3 ha avec D3		Doses -	Surf-, en sec	Surf-, en sec
		moyens	5 ha avec D3	Surf+	Surf-	Surf+, Doses -	Surf+, Doses -
		profonds	7 ha avec D2	Surf-	Surf+	ABS	ABS
Beth	humide	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		profonds	3 ha avec D1	ABS	ABS	ABS	ABS
	moyenne	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		profonds	3 ha avec D3	ABS	ABS	ABS	ABS
	sèche	superficiels	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		moyens	ABS	ABS	ABS	ABS	ABS
		profonds	3 ha avec D2	ABS	ABS	ABS	ABS

■ : Pas de changements.

**BDh** : blé dur d'hiver, **Orgeb** : orge de brasserie, **POISp** : pois protéagineux, **Col** : colza, **BtB** : blé de blé, **Bd0** : blé dur rémunéré à un prix bas, **Bsucre** : Betterave à sucre, **Beth** : betterave éthanol.

**Tableau 3. Evolution de la consommation en eau totale moyenne et par type d'années climatiques en fonction des différents volumes de référence en m<sup>3</sup>**

	<b>S0=71,5</b>	<b>60,5</b>	<b>49,5</b>	<b>33</b>	<b>22</b>
<b>ps*es</b>	<b>71500</b>	<b>60500</b>	<b>49500</b>	<b>33000</b>	<b>22000</b>
<b>ps*em</b>	<b>71500</b>	<b>60500</b>	<b>49500</b>	<b>33000</b>	<b>22000</b>
<b>ps*eh</b>	54177	46350	38962	23721	19003
<b>pm*es</b>	<b>71500</b>	<b>60500</b>	<b>49500</b>	<b>33000</b>	<b>22000</b>
<b>pm*em</b>	<b>71500</b>	<b>60500</b>	<b>49500</b>	<b>33000</b>	<b>22000</b>
<b>pm*eh</b>	54177	46350	38962	23721	19003
<b>ph*es</b>	64603	60410	<b>49500</b>	<b>33000</b>	<b>22000</b>
<b>ph*em</b>	64603	60410	<b>49500</b>	<b>33000</b>	<b>22000</b>
<b>ph*eh</b>	47280	46260	38962	23721	19003
<b>Consommation totale moyenne</b>	66172	57367	47182	30959	21341
<b>% de baisse</b>	0	13	29	53	68

PS : printemps sec, ES : été sec, PM : printemps moyen, EM : été moyen, PH : printemps humide, EH : été humide.

**Tableau 4. Evolution de l'allocation de l'eau entre les cultures en fonction des différents volumes de référence, pour différents états climatiques en m<sup>3</sup>**

	<b>cultures</b>	<b>S0=71,5</b>	<b>60,5</b>	<b>49,5</b>	<b>33</b>	<b>22</b>
<b>ps</b>	BDh	5 536	4500	5625	5975	4912
	Orgeb	17 961	14526	11974	6424	6405
	POISp	0	0	0	0	0
	BtB	14 553	14553	9303		
	Bd0	2 848	519	4258	1713	1555
<b>pm</b>	BDh	6 648	6000	7125	5975	4912
	Orgeb	11974	11974	11974	6424	6405
	POISp	4875	1053	1460		
	BtB	14553	14553	6343		
	Bd0	2848	519	4258	1713	1555
<b>ph</b>	BDh	4074	3750	4063	2871	1665
	Orgeb	11974	11974	11974	9154	9278
	POISp	2438	526	730	375	375
	BtB	12667	17239	10135		
	Bd0	2848	519	4258	1713	1555
<b>es</b>	maïs	0	0			
	Bsucre	25558	26402	18341	18888	9127
	Beth	5045				
<b>em</b>	maïs	7956	7222			
	Bsucre	18864	19180	18341	18888	9127
	Beth	3784				
<b>eh</b>	maïs	3344	3051			
	Bsucre	8674	9202	7802	9609	6130
	Beth	1261				

**BDh** : blé dur d'hiver, **Orgeb** : orge de brasserie, **POISp** : pois protéagineux, **Col** : colza, **BtB** : blé de blé, **Bd0** : blé dur rémunéré à un prix bas, **Bsucre** : Betterave à sucre, **Beth** : betterave éthanol.

PS : printemps sec, ES : été sec, PM : printemps moyen, EM : été moyen, PH : printemps humide, EH : été humide.

**Tableau 5. Evolution du revenu total moyen, du revenu par hectare et du revenu par type d'année, selon les différents niveaux du volume de référence, en €**

	<b>S0=71,5</b>	<b>60,5</b>	<b>49,5</b>	<b>33</b>	<b>22</b>
<b>ps*es</b>	120 469	117 666	113 906	105 231	100 658
<b>ps*em</b>	132 023	127 404	123 487	115 390	107 544
<b>ps*eh</b>	136 396	131 461	126 359	120 099	112 587
<b>pm*es</b>	134 337	132 127	129 194	119 720	115 497
<b>pm*em</b>	145 891	141 865	138 775	129 879	122 383
<b>pm*eh</b>	150 263	145 922	141 647	134 588	127 425
<b>ph*es</b>	140 976	141 177	137 754	130 233	126 297
<b>ph*em</b>	152 530	150 915	147 335	140 392	133 183
<b>ph*eh</b>	156 903	154 972	150 207	145 102	138 225
<b>revenu total moyen</b>	142721	139425	135819	127805	121089
<b>revenu moyen par</b>	1427	1394	1358	1278	1211

PS : printemps sec, ES : été sec, PM : printemps moyen, EM : été moyen, PH : printemps humide, EH : été humide.

**Tableau 6. Evolution de la contribution de chaque culture au revenu global (en %).**

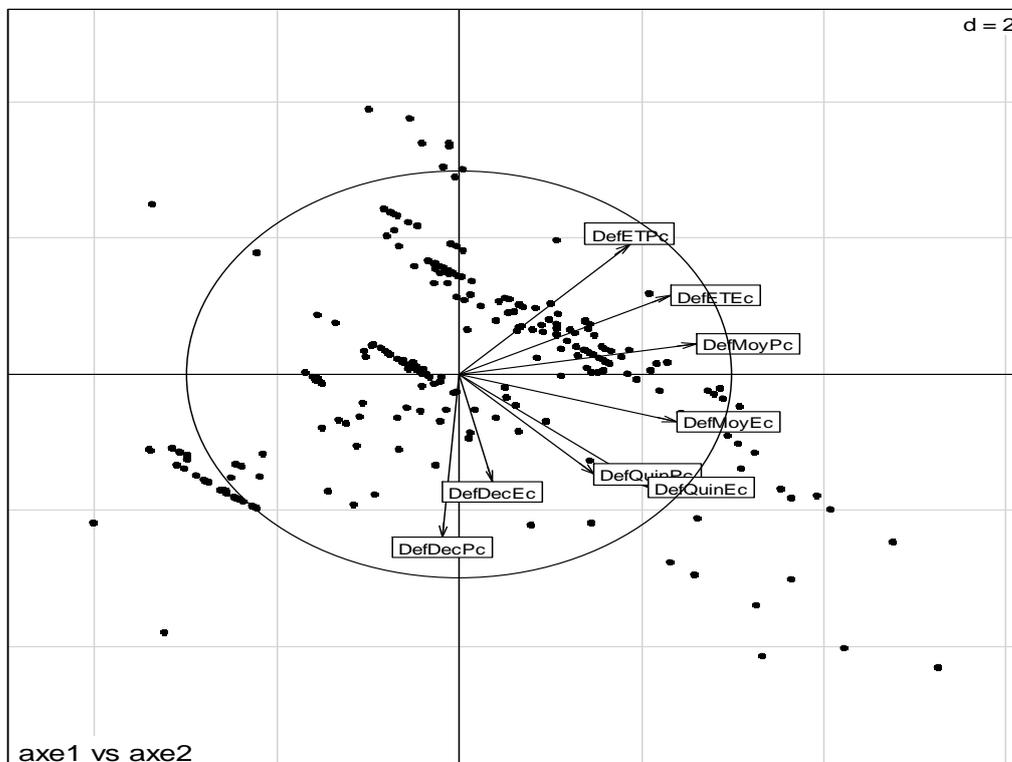
	<b>S0=71,5</b>	<b>60,5</b>	<b>49,5</b>	<b>33</b>	<b>22</b>
<b>BDh</b>	13	14	15	16	17
<b>Orgeb</b>	23	24	26	26	28
<b>POISp</b>	4	1	1	1	1
<b>BtB</b>	28	39	25	33	36
<b>Bd0</b>	8	2	14	6	6
<b>maïs</b>	3	3	0	0	0
<b>Bsucre</b>	18	19	20	19	12
<b>Beth</b>	3	0	0	0	0
<b>col</b>	0	2	8	7	11

**BDh** : blé dur d'hiver, **Orgeb** : orge de brasserie, **POISp** : pois protéagineux, **Col** : colza, **BtB** : blé de blé, **Bd0** : blé dur rémunéré à un prix bas, **Bsucre** : Betterave à sucre, **Beth** : betterave éthanol.

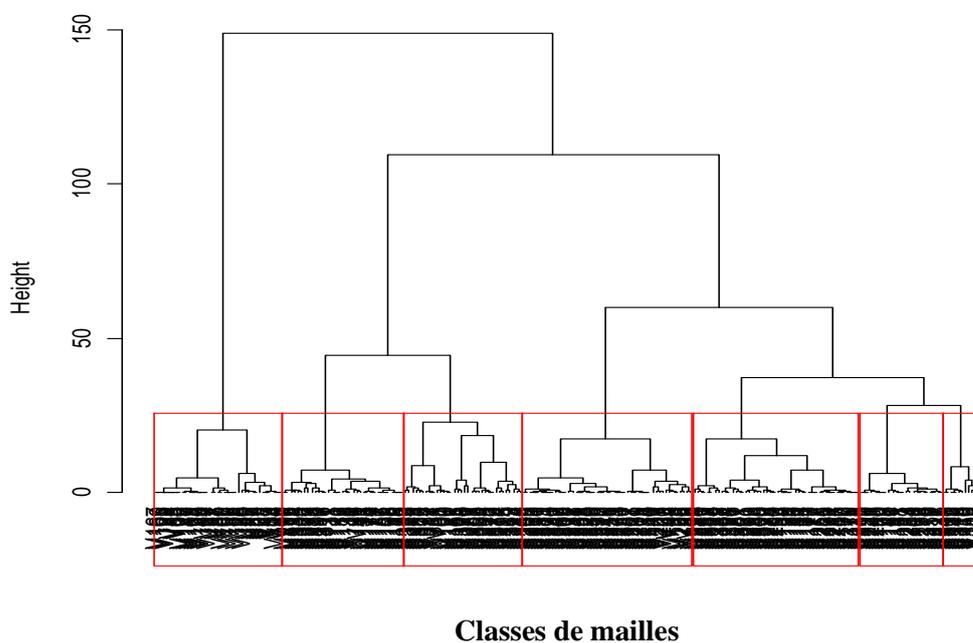
## Annexe 5 : Résultats de l'ACP et de la classification hiérarchique

### Variables météo utilisées dans l'ACP

- DefMoyP :** Moyenne du déficit P-ETP sur la période d'irrigation de printemps (10/04-20/06) calculée sur 18 années (1990-2007)
- DefETP :** Ecart-type du déficit P-ETP sur la période d'irrigation de printemps (10/04-20/06) calculé sur 18 années (1990-2007)
- DefQuinP :** Valeur quinquennale du déficit P-ETP sur la période d'irrigation de printemps (10/04-20/06) calculée sur 18 années (1990-2007)
- DefDecP :** Valeur décennale du déficit P-ETP sur la période d'irrigation de printemps (10/04-20/06) calculée sur 18 années (1990-2007)
- DefMoyE :** Moyenne du déficit P-ETP sur la période d'irrigation d'été (10/06-25/08) calculée sur 18 années (1990-2007)
- DefETE :** Ecart-type du déficit P-ETP sur la période d'irrigation d'été (10/06-25/08) calculé sur 18 années (1990-2007)
- DefQuinE :** Valeur quinquennale du déficit P-ETP sur la période d'irrigation d'été (10/06-25/08) calculée sur 18 années (1990-2007)
- DefDecE :** Valeur décennale du déficit P-ETP sur la période d'irrigation d'été (10/06-25/08) calculée sur 18 années (1990-2007)
- DefMoyPc :** Moyenne du déficit P-ETP sur la période d'irrigation critique de printemps (25/04-01/06) calculée sur 18 années (1990-2007)
- DefETPc :** Ecart-type du déficit P-ETP sur la période d'irrigation critique de printemps (25/04-01/06) calculé sur 18 années (1990-2007)
- DefQuinPc :** Valeur quinquennale du déficit P-ETP sur la période d'irrigation critique de printemps (25/04-01/06) calculée sur 18 années (1990-2007)
- DefDecPc :** Valeur décennale du déficit P-ETP sur la période d'irrigation critique de printemps (25/04-01/06) calculée sur 18 années (1990-2007)
- DefMoyEc :** Moyenne du déficit P-ETP sur la période d'irrigation critique d'été (01/07-10/08) calculée sur 18 années (1990-2007)
- DefETEc :** Ecart-type du déficit P-ETP sur la période d'irrigation critique d'été (01/07-10/08) calculé sur 18 années (1990-2007)
- DefQuinEc :** Valeur quinquennale du déficit P-ETP sur la période d'irrigation critique d'été (01/07-10/08) calculée sur 18 années (1990-2007)
- DefDecEc :** Valeur décennale du déficit P-ETP sur la période d'irrigation critique d'été (01/07-10/08) calculée sur 18 années (1990-2007)



**Figure 1.** Projection des variables sur le plan (1,2)



**Figure 2.** Arbre hiérarchique

**Tableau 1.** Description des classes de mailles par les variables météo

Classe 1	v.test	Mean in category	Overall mean	sd in category	Overall	p.value
DefDecPc	8.391717	-66.45432	-71.13198	1.397797	3.683152	4.79E-17
DefETP	-2.369991	39.22676	40.35519	2.136565	3.146089	1.78E-02
DefQuinEc	-3.127587	-120.33324	-118.40021	1.465628	4.083867	1.76E-03
DefETE	-5.590121	57.12595	61.19743	2.793889	4.812525	2.27E-08
DefDecP	-6.755494	-141.67459	-132.8454	4.284682	8.635864	1.42E-11
DefMoyEc	-8.268993	-91.40162	-86.7173	1.805214	3.743139	1.35E-16
DefMoyPc	-8.441284	-42.74595	-38.28949	1.797914	3.488371	3.14E-17
DefDecE	-8.893416	-229.61757	-220.67224	4.740529	6.646143	5.93E-19
DefMoyE	-9.848503	-175.49541	-164.61684	3.004757	7.298666	6.96E-23
DefMoyP	-9.870899	-91.85459	-81.89122	2.551635	6.669472	5.57E-23
DefQuinP	-10.124513	-131.32865	-118.44498	5.39386	8.408283	4.30E-24
DefETPc	-10.501763	24.97676	29.97873	1.313481	3.147179	8.48E-26
DefQuinE	-10.596038	-222.74649	-208.78772	5.890924	8.70453	3.11E-26
DefETEc	-11.308454	38.51486	45.46034	2.194381	4.058265	1.19E-29

<b>Classe 2</b>	<b>v.test</b>	<b>Mean in category</b>	<b>Overall mean</b>	<b>sd in category</b>	<b>Overall</b>	<b>p.value</b>
<b>DefDecE</b>	4.290605	-217.03633	-220.67224	4.1101515	6.646143	1.78E-05
<b>DefDecP</b>	-1.965648	-135.0098	-132.8454	5.20792	8.635864	4.93E-02
<b>DefQuinP</b>	-2.109094	-120.70612	-118.44498	5.6257578	8.408283	3.49E-02
<b>DefQuinEc</b>	-3.05037	-119.98857	-118.40021	0.7078539	4.083867	2.29E-03
<b>DefMoyP</b>	-5.16956	-86.28735	-81.89122	2.2649276	6.669472	2.35E-07
<b>DefETPc</b>	-5.574421	27.74184	29.97873	0.7934365	3.147179	2.48E-08
<b>DefMoyPc</b>	-5.934332	-40.92898	-38.28949	0.782863	3.488371	2.95E-09
<b>DefETE</b>	-6.198232	57.39408	61.19743	0.8811586	4.812525	5.71E-10

<b>Classe 3</b>	<b>v.test</b>	<b>Mean in category</b>	<b>Overall mean</b>	<b>sd in category</b>	<b>Overall</b>	<b>p.value</b>
DefQuinEc	9.306067	-112.35529	-118.40021	5.136754	4.083867	1.33E-20
DefMoyEc	9.059493	-81.32353	-86.7173	4.487227	3.743139	1.31E-19
DefQuinE	8.309181	-197.28353	-208.78772	8.377526	8.70453	9.64E-17
DefMoyE	8.245162	-155.045	-164.61684	6.55765	7.298666	1.65E-16
DefQuinPc	7.168974	-56.45735	-60.12996	2.914459	3.220806	7.56E-13
DefDecP	6.379435	-124.08265	-132.8454	9.695552	8.635864	1.78E-10
DefMoyPc	6.27954	-34.80529	-38.28949	3.209595	3.488371	3.40E-10
DefDecE	6.231334	-214.085	-220.67224	5.914692	6.646143	4.62E-10
DefMoyP	5.941865	-75.58794	-81.89122	5.335445	6.669472	2.82E-09
DefDecPc	5.71674	-67.78294	-71.13198	2.657589	3.683152	1.09E-08
DefETEc	5.65314	49.10941	45.46034	2.440175	4.058265	1.58E-08
DefDecEc	5.290947	-123.99882	-127.7419	5.310768	4.447773	1.22E-07
DefETP	4.340203	42.52706	40.35519	5.202897	3.146089	1.42E-05
DefQuinP	4.086725	-112.97941	-118.44498	8.105995	8.408283	4.38E-05
DefETE	3.58519	63.94176	61.19743	5.850366	4.812525	3.37E-04

<b>Classe 4</b>	<b>v.test</b>	<b>Mean in category</b>	<b>Overall mean</b>	<b>sd in category</b>	<b>Overall</b>	<b>p.value</b>
<b>DefETE</b>	7.489185	66.83371	61.19743	1.886562	4.812525	6.93E-14
<b>DefMoyP</b>	5.846771	-75.79314	-81.89122	1.861402	6.669472	5.01E-09
<b>DefMoyPc</b>	5.705323	-35.17714	-38.28949	1.281908	3.488371	1.16E-08
<b>DefDecP</b>	5.427638	-125.51543	-132.8454	5.291638	8.635864	5.71E-08
<b>DefQuinP</b>	5.27545	-111.50829	-118.44498	4.534892	8.408283	1.32E-07
<b>DefETEc</b>	4.504173	48.31886	45.46034	1.762247	4.058265	6.66E-06
<b>DefQuinPc</b>	3.941234	-58.14486	-60.12996	2.265479	3.220806	8.11E-05
<b>DefETPc</b>	3.688939	31.79429	29.97873	1.049139	3.147179	2.25E-04
<b>DefQuinEc</b>	3.345824	-116.26343	-118.40021	2.054866	4.083867	8.20E-04
<b>DefMoyE</b>	2.735524	-161.49457	-164.61684	1.718738	7.298666	6.23E-03
<b>DefETP</b>	-2.569832	39.09086	40.35519	3.496386	3.146089	1.02E-02
<b>DefDecEc</b>	-6.785733	-132.46171	-127.7419	2.681649	4.447773	1.15E-11

Classe 5	v.test	Mean in category	Overall mean	sd in category	Overall	p.value
DefDecEc	5.39636	-120.298	-127.7419	4.275949	4.447773	6.80E-08
DefMoyE	2.34221	-159.315	-164.61684	7.778279	7.298666	1.92E-02
DefETEc	-2.649184	42.126	45.46034	1.780692	4.058265	8.07E-03
DefETP	-3.537048	36.904	40.35519	1.482486	3.146089	4.05E-04
DefETE	-4.282209	54.806	61.19743	2.449936	4.812525	1.85E-05
DefQuinPc	-6.574281	-66.697	-60.12996	1.367458	3.220806	4.89E-11

Classe 6	v.test	Mean in category	Overall mean	sd in category	Overall	p.value
DefETPc	6.674161	32.69188	29.97873	0.6449957	3.147179	2.49E-11
DefETE	3.7477	63.52708	61.19743	3.0625432	4.812525	1.78E-04
DefETP	3.339544	41.71229	40.35519	1.2980293	3.146089	8.39E-04
DefETEc	3.063168	47.06604	45.46034	2.4917002	4.058265	2.19E-03
DefDecP	-2.145213	-135.23833	-132.8454	7.4315584	8.635864	3.19E-02
DefMoyEc	-2.180297	-87.77146	-86.7173	1.2304234	3.743139	2.92E-02
DefDecEc	-4.040002	-130.06292	-127.7419	3.4759747	4.447773	5.35E-05
DefQuinPc	-6.660867	-62.90104	-60.12996	1.8695802	3.220806	2.72E-11
DefQuinEc	-6.886592	-122.03292	-118.40021	2.4466746	4.083867	5.71E-12
DefDecPc	-7.169674	-74.54292	-71.13198	2.8015628	3.683152	7.52E-13

Classe 7	v.test	Mean in category	Overall mean	sd in category	Overall	p.value
DefETPc	5.20709	33.15667	29.97873	0.3130451	3.147179	1.92E-07
DefMoyPc	4.385971	-35.3225	-38.28949	0.8829649	3.488371	1.15E-05
DefDecEc	3.565391	-124.66667	-127.7419	0.6757568	4.447773	3.63E-04
DefMoyP	3.153264	-77.81292	-81.89122	1.536065	6.669472	1.61E-03
DefQuinP	2.614383	-114.18208	-118.44498	1.3482272	8.408283	8.94E-03
DefDecPc	-4.542227	-74.37625	-71.13198	1.5591365	3.683152	5.57E-06

## Annexe 6 : Modèle d'exploitation GC-Betterave écrit sur GAMS

\$Otext

Nom : Modèle générique d'exploitaion de type Grandes-cultures Betterave

Description : Modélisation micro-économique spatialisée des exploitations irrigantes dans la Beauce (2011-2012)

Langage GAMS

\$Offtext

\*~~~~~Indices~~~~~

sets

cp culture irriguee au printemps/BTh,BDh,orgeh,Orgeb,POISp,col,BtB,Bd0,OrgB0 /

ce cultures irriguees en ete /mais,Bsucre,Beth/

S type de sol/S1 sol superficiel,S2 sol moyen,S3 sol profond/

D dose d irrigation/D0,D1,D2,D3,d4/

TP type de printemps/ps printemps sec,pm printemps moyen, ph printemps humide/

TE type d ete/es ete sec,em ete moyen, eh ete humide/

IT Itération/it1\*it10/

CSDP(cp,s,d,tp) ensemble des combinaisons culture printemps-sol-dose-type de printemps

/

BTh.S1.(D0\*D2).(ps,pm,ph)

BTh.S1.D3.(ps,pm)

BTh.S1.D4.ps

BTh.S2.(D0,D1).(ps,pm,ph)

BTh.S2.D2.(ps,pm)

BTh.S2.D3.ps

BTh.S3.(D0,D1).(ps,pm,ph)

BTh.S3.D2.ps

BDh.S1.(D0\*D2).(ps,pm,ph)

BDh.S1.D3.(ps,pm)

BDh.S1.D4.ps

BDh.S2.(D0,D1).(ps,pm,ph)

BDh.S2.D2.(ps,pm)

BDh.S2.D3.ps

BDh.S3.(D0,D1).(ps,pm,ph)

BDh.S3.D2.(ps,pm)

BDh.S3.D3.ps

Orgeh.S1.(D0\*D2).(ps,pm,ph)

Orgeh.S1.D3.(ps,pm)

Orgeh.S1.D4.ps

Orgeh.S2.(D0,D1).(ps,pm,ph)

Orgeh.S2.D2.(ps,pm)

Orgeh.S2.D3.ps

Orgeh.S3.(D0,D1).(ps,pm,ph)

Orgeh.S3.D2.ps

Orgeb.S1.(D0\*D3).(ps,pm,ph)

Orgeb.S2.(D0\*D2).(ps,pm,ph)

Orgeb.S2.D3.ps

Orgeb.S3.(D0,D1).(ps,pm,ph)

Orgeb.S3.D2.ps

POISp.S1.(D0,D1).(ps,pm,ph)

POISp.S1.D2.(ps,pm)

POISp.S1.D3.ps

POISp.S2.(D0,D1).(ps,pm,ph)

POISp.S2.D2.(ps,pm)

POISp.S2.D3.ps

POISp.S3.(D0,D1).(ps,pm,ph)

POISp.S3.D2.(ps,pm)

POISp.S3.D3.ps

col.S1.D0.(ps,pm,ph)  
col.S2.D0.(ps,pm,ph)  
col.S3.D0.(ps,pm,ph)

BtB.S1.(D0\*D2).(ps,pm,ph)  
BtB.S1.D3.(ps,pm)  
BtB.S1.D4.ps  
BtB.S2.(D0,D1).(ps,pm,ph)  
BtB.S2.D2.(ps,pm)  
BtB.S2.D3.ps  
BtB.S3.(D0,D1).(ps,pm,ph)  
BtB.S3.D2.ps

Bd0.S1.(D0\*D2).(ps,pm,ph)  
Bd0.S1.D3.(ps,pm)  
Bd0.S1.D4.ps  
Bd0.S2.(D0,D1).(ps,pm,ph)  
Bd0.S2.D2.(ps,pm)  
Bd0.S2.D3.ps  
Bd0.S3.(D0,D1).(ps,pm,ph)  
Bd0.S3.D2.(ps,pm)  
Bd0.S3.D3.ps

OrgB0.S1.(D0\*D3).(ps,pm,ph)  
OrgB0.S2.(D0\*D2).(ps,pm,ph)  
OrgB0.S2.D3.ps  
OrgB0.S3.(D0,D1).(ps,pm,ph)  
OrgB0.S3.D2.ps

/

CSDE(ce,s,d,te) ensemble de combinaisons culture été-sol-dose-type d'été

/

mais.S1.(D0\*D2).(es,em,eh)  
mais.S1.D3.(es,em)  
mais.S1.D4.es  
mais.S2.(D0\*D2).(es,em,eh)  
mais.S2.D3.(es,em)  
mais.S2.D4.(es,em)  
mais.S3.(D0,D1).(es,em,eh)  
mais.S3.D2.(es,em)  
mais.S3.D3.es

Bsucre.S1.(D0\*D3).(es,em,eh)  
Bsucre.S1.D4.(es,em)  
Bsucre.S2.(D0\*D2).(es,em,eh)  
Bsucre.S2.D3.(es,em)  
Bsucre.S3.(D0,D1).(es,em,eh)  
Bsucre.S3.D2.(es,em)  
Bsucre.S3.D3.(es,em)

Beth.S1.(D0\*D3).(es,em,eh)  
Beth.S1.D4.(es,em)  
Beth.S2.(D0\*D2).(es,em,eh)  
Beth.S2.D3.(es,em)  
Beth.S3.(D0,D1).(es,em,eh)  
Beth.S3.D2.(es,em)  
Beth.S3.D3.(es,em)

/

;

\*~~~~~Données~~~~~

scalar

coefNap coefficient de nappe (coefficient de réduction du volume de référence fonction du niveau de la nappe)/0.65/  
ED volume d'eau de référence en m3 /110000 /

\*Brunel( 2007 et 2009)  
 PE prix de l'eau par m3 (euro) /0.055/  
 \*PE est la part variable du tarif  
 debmax debit d irrigation maximal (m3 par heure) /110/  
 DPU montant des aides (euro par hectare) /203/  
 \*Brunel( 2007 et 2009)  
 maxBsucre quantité maximale de la betterave qui sera destinée à la production de sucre pour toute exploitation (quintaux)/15000/  
 maxBDh Production maximale de blé dur permise par le contrat pour toute l'exploitation (quintaux)/700/  
 maxOrgeB Production maximale d'orge de brasserie permise par le contrat pour toute l'exploitation (quintaux)/1300/

;  
 Parameter

TD(s) terre disponible en ha /S1 10,s2 55 ,s3 35/  
 \*source SAU totale ROSACE = 100 ha  
 p1(TP) probabilité d apparition des types de printemps  
 /ps 0.22  
 pm 0.56  
 ph 0.22 /  
 p2(TE) probabilité d apparition des types d ete  
 /es 0.22  
 em 0.56  
 eh 0.22 /

\$ontext  
 sim(IT) test de sensibilité à la variation du volume de référence  
 /IT1 0.65  
 IT2 0.55  
 IT3 0.45  
 IT4 0.30  
 IT5 0.20  
 /

\$offtext  
 ;  
 Table  
 Dp(cp,s,d,tp) doses d eau apportees aux cultures irriguees au printemps (m3 par ha)  
 \$include Doses CIP.txt  
 option Dp:0;  
 display Dp

;  
 Table  
 De(ce,s,d,te) doses d eau apportees aux cultures irriguees en ete (m3 par ha)  
 \$include Doses CIE.txt  
 option De:0;  
 display De

;  
 Table  
 RDTp(cp,S,d,TP) rendement des cultures irriguees au printemps par type de sol par type de printemps et par dose d irrigation (quintaux par ha)  
 \$include Rdt CIP.txt  
 option RDTp:0;  
 display RDTp  
 ;

Table  
 RDTe(ce,S,d,TE) rendement des cultures irriguees en ete par type de sol par type d ete et par dose d irrigation (quintaux par ha)  
 \$include Rdt CIE.txt  
 option RDTe:0;  
 display RDTe  
 ;

table  
 debP(cp,S,d,TP) debit d irrigation de printemps par culture irriguee au printemps par type de sol par type de printemps et par dose d irrigation (m3 par heure et par ha)

```
$include Débit CIP.txt
option debP:0;
display debP
;
```

table

debE(ce,S,d,TE) debit d irrigation d ete par culture irriguee en ete par type de sol par type d ete et par dose d irrigation (m3 par heure et par ha)

```
$include Débit CIE.txt
```

```
option debE:0;
```

```
display debE
```

```
;
```

```
parameter
```

```
COp (cp) charges operationnelle hors irrigation par culture de printemps (euros par ha)
```

```
/
```

```
BTh 398
```

```
BDh 496
```

```
Orgeh 402
```

```
Orgeb 363
```

```
POISp 362
```

```
col 488
```

```
BtB 398
```

```
Bd0 496
```

```
OrgB0 363/
```

COe (ce) charges operationnelle hors irrigation par culture d ete (euros par ha)

```
/
```

```
mais 676
```

```
Bsucre 840
```

```
Beth 840 /
```

pvp (cp) prix de vente des produits agricoles par culture irriguee en printemps (euro par quintal)

```
/
```

```
BTh 18
```

```
BDh 29.3
```

```
Orgeh 18.2
```

```
Orgeb 25.8
```

```
POISp 21.1
```

```
col 27.8
```

```
BtB 18
```

```
Bd0 24
```

```
OrgB0 23
```

```
/
```

pve (ce) prix de vente des produits agricoles par culture irriguee en ete (euro par quintal)

```
/
```

```
mais 14.3
```

```
Bsucre 2.6
```

```
Beth 2.15
```

```
/
```

\*laurent (2007)

PRp(cp) primes par cultures irriguee en printemps en euro par hectare

```
/
```

```
BTh 89.6
```

```
BDh 89.6
```

```
Orgeh 89.6
```

```
Orgeb 110.8
```

```
POISp 110.8
```

```
col 89.6
```

```
BtB 89.6
```

```
Bd0 89.6
```

```
OrgB0 110.8
```

```

/
PRe (ce) primes par cultures irriguee en ete en euro par hectare
/
mais 110.8
Bsucre 0
Beth 0
/
;

*-----CALCULS Intermédiaires-----
parameters
RDTesP(cp,S,d) rendements espérés des cultures irriguées au printemps
RDTesE(ce,S,d) rendements espérés des cultures irriguées en été
;
RDTesP(cp,S,d)=sum(tp, p1(tp)*RDTp(cp,S,d,tp)$CSDP(cp,s,d,tp));
RDTesE(ce,S,d)=sum(te, p2(te)*RDTe(ce,S,d,te)$CSDE(ce,s,d,te));

option RDTesP:1;
option RDTesE:1;

display RDTesP,RDTesE;
;
Parameter
MBP(cp,S,d,tp) marge brute par activite au printemps hors DPU(euros par ha)
MBE(ce,S,d,te) marge brute par activite en Ete hors DPU(euros par ha)
MBesP(cp,S,d) marge brute espérée par activite au printemps hors DPU(euros par ha)
MBesE(ce,S,d) marge brute espérée par activite en Ete hors DPU(euros par ha)
MBesP2(cp) marge brute espérée par CULTURE au printemps hors DPU(euros par ha)
MBesE2(ce) marge brute espérée par CULTURE en Ete hors DPU(euros par ha)
;
MBP(cp,S,d,tp)$CSDP(cp,s,d,tp)=RDTp(cp,S,d,tp)*pvp(cp)+ PRp(Cp)-COp(cp)- PE*Dp(cp,s,d,tp);
MBE(ce,s,d,te)$CSDE(ce,s,d,te) =RDTe(ce,S,d,te)*pve(ce)+PRE(Ce)-COe(ce)-PE*De(ce,s,d,te);
MBesP(cp,S,d)=sum(tp,p1(tp)*MBP(cp,S,d,tp));
MBesE(ce,s,d)=sum(te,p2(te)*MBE(ce,S,d,te));
MBesP2(cp)=sum((s,d,tp),p1(tp)*MBP(cp,S,d,tp));
MBesE2(ce)=sum((s,d,te),p2(te)*MBE(ce,S,d,te));

option MBP:0;
option MBE:0;
option MBesP:0;
option MBesE:0;
option MBesP2:0;
option MBesE2:0;

Display MBP,MBE,MBesP,MBesE,MBesP2,MBesE2;

*-----modele-----

variables
Z revenu total en euro
ConsEAU(tp,te) consommation d eau
prodBett(te) production totale de la betterave par type d'été
;
positive variables

Xp (cp,S) superficie decidee a l automne de la culture irrigue au printemps cp sur le sol s (ha)
Xe (ce,S) superficie decidee a l automne de la culture irriguee en ete ce sur le sol s (ha)
Xip(cp,s,d,tp) superficie de la culture cp irriguee au printemps par type de sol dose d irrigation et type de printemps (ha)
Xie(ce,s,d,te) superficie de la culture ce irriguee en ete par type de sol dose d irrigation et type d ete (ha)
SommeCerealehiver Superficie totale destinée aux céréales d'hiver(BTh-BDh-Orgeh)
;

```

\*~~~~~Equations~~~~~

equations

objectif fonction objective

terre contrainte terre

eau contrainte eau

dbp contrainte debit d irrigation au le printemps

dbe contrainte debit d irrigation au l ete

liaisonP contrainte de liason printemps

liaisonE contrainte de liaison été

Rot1 Contrainte de rotation pour les tetes d'assolement(PoisP-colza-mais-betterave)=surface des tetes d'assolement superieure ou egale a la somme des surfaces des cultures qui leur succèdent

rotPOISp contrainte rotation pour le pois (1 annee sur 8)

rotbett contrainte rotation pour la betterave sucriere et la betterave ethanol (1 annee sur 3)

rotcol contrainte rotation pour le colza (1 annee sur 3)

rotmais contrainte rotation pour le maïs (1 annee sur 2)

quotaBDh contrainte volume de production max pour le ble dur qui sera vendu au prix le plus élevé

quotaOrgeB contrainte volume de production max pour l orge de brasserie qui sera vendu au prix le plus élevé

quotaBsucre contrainte volume de production max pour la betterave destiné à la production de sucre

consE(tp,te) consommation en eau totale pour chaque état de la nature (m3)

CerHiver Superficie totale destinée aux céréales d'hiver(BTh-BDh-Orgeh)

PBett production totale de betterave selon l'état de la nature (quintal)

\*~~~~~

objectif..sum((cp,S,d,tp)\$CSDP(cp,s,d,tp),((p1(tp)\*xip(cp,s,d,tp))\*(RDTp(cp,s,d,tp)\*pvp(cp)-PE\*Dp(cp,s,d,tp)))) +  
sum((ce,S,d,te)\$CSDE(ce,s,d,te),((p2(te)\*xie(ce,s,d,te))\*(RDTE(ce,s,d,te)\*pve(ce)-  
PE\*De(ce,s,d,te))))+sum((cp,s),(xp(cp,s)\*(PRp(cp)-COP(cp)))) + sum((ce,s),(xe(ce,s)\*(PRE(ce)-COe(ce)))) +  
dpu\*sum(s,TD(s))=E=Z

terre(s)..sum((cp),xp(cp,s))+ sum((ce),xe(ce,s))=l=TD(S)

eau(tp,te)..sum((cp,s,d)\$CSDP(cp,s,d,tp),dp(cp,s,d,tp)\*Xip(cp,s,d,tp))+sum((ce,s,d)\$CSDE(ce,s,d,te),de(ce,s,d,te)\*Xie(ce,s,d,te))=l=ED\*(coefNap)

dbp(tp)..sum((cp,S,d)\$CSDP(cp,s,d,tp),debp(cp,s,d,TP)\*xip(cp,s,d,tp))=l=debmax

dbe(te)..sum((ce,S,d)\$CSDE(ce,s,d,te),debe(ce,s,d,te)\*xie(ce,s,d,te))=l=debmax

liaisonP(cp,s,tp)..Xp(cp,S)=g=sum(d\$CSDP(cp,s,d,tp),Xip(cp,s,d,tp))

liaisonE(ce,s,te)..Xe(ce,S)=g= sum (d\$CSDE(ce,s,d,te),Xie(ce,s,d,te))

\*~~~~~Contraintes de rotation~~~~~

Rot1(s)..xp('BTh',s)+xp('BDh',s)+xp('orgeh',s)+  
xp('orgeb',s)+xp('Bd0',s)+xp('OrgB0',s)=l=xp('POISp',s)+xp('col',s)+xe('maïs',s)+xe('Bsucre',s)+xe('Beth',s)

rotPOISp(s)..xp('POISp',s)=l=td(s)\*0.125

rotbett(s)..xe('Bsucre',s)+ xe('Beth',s)=l=td(s)\*0.33

rotcol(s)..xp('col',s)=l=td(s)\*0.33

rotmais(s)..xe('maïs',s)=l=td(s)\*0.5

\*~~~~~Contraintes filières~~~~~

quotaBDh(tp)..sum((s,d)\$CSDP("BDh",s,d,tp),RDTp('BDh',s,d,tp)\*Xip('BDh',s,d,tp))=l=maxBDh

quotaOrgeB(tp)..sum((s,d)\$CSDP("Orgeb",s,d,tp),RDTp('Orgeb',s,d,tp)\*Xip('Orgeb',s,d,tp))=l=maxOrgeb

quotabsucre(te)..sum((s,d)\$CSDE("Bsucre",s,d,te),RDTE('Bsucre',s,d,te)\*Xie('Bsucre',s,d,te))=l=maxBsucre

;

```

*~~~~~Calcul des surfaces et des volumes~~~~~

consE(tp,te)..sum((cp,s,d)$CSDDP(cp,s,d,tp),dp(cp,s,d,tp)*Xip(cp,s,d,tp))+sum((ce,s,d)$CSDE(ce,s,d,te),de(ce,s,d,te)*Xie(ce,
s,d,te))=e=consEAU(tp,te)
;
CerHiver..sum (s, xp('BTh',s)+xp('BDh',s)+xp('Orgeh',s)+xp('BtB',s)+xp('Bd0',s)+xp('OrgB0',s))=e=SommeCerealehiver
;
Pbett(te)..sum((s,d)$CSDE("Bsucre",s,d,te),xie('Bsucre',s,d,te)*RDTe('Bsucre',s,d,te))+sum((s,d)$CSDE("Beth",s,d,te),xie('B
eth',s,d,te)*RDTe('Beth',s,d,te))=e=Prodbett(te)
;

*~~~~~Solution~~~~~
model STOCHAST1 modele programmation stochastique discrete /all/

Parameter

result1(*,*,*,*)
result2(*,*,*,*)
result3(*,*,*,*,*)
result4(*,*,*,*)
result5(*,*,*,*)
result6(*,*,*,*,*)
result7(*,*)
coefNap_sim(*,*)
;
option
Result1:2:1:1
Result2:1:2:1
Result3:2:3:1
Result4:1:2:1
Result5:2:1:1
Result6:2:2:1
;
$libinclude xldump
loop(it,coefNap=sim(it);

*~~~~~Solution sans PMP~~~~~
solve STOCHAST1 using LP maximizing Z;

Result1('TOT','Cer','paille',IT)=
sum(s,xp.l('BTh',s)+xp.l('BDh',s)+xp.l('Orgeh',s)+xp.l('Orgeb',s)+xp.l('BtB',s)+xp.l('Bd0',s)+xp.l('OrgB0',s));
Result1('ass','XP','tot',IT)=sum((cp,s),xp.l(cp,s));
Result1('ass','XE','tot',IT)=sum((ce,s),xe.l(ce,s));
Result1('ass','XP',cp,IT)=sum(s,xp.l(cp,s));
Result1('ass','XE',ce,IT)=sum(s,xe.l(ce,s));
Result1('ass','tot',s,IT)=sum(cp,xp.l(cp,s))+sum(ce,xe.l(ce,s));
Result1('ass_tot','XP',S,IT)=sum(cp,xp.l(cp,s));
Result1('ass_tot','XE',s,IT)=sum(ce,xe.l(ce,s));

Result2('ass_XP',S,cp,IT)=xp.l(cp,s);
Result2('ass_XE',s,ce,IT)=xe.l(ce,s);
Result2('surf_tot_sec',tp,te,it)= sum((cp,s),Xip.l(cp,s,'d0',tp))+sum((ce,s),Xie.l(ce,s,'d0',te));
Result2('surf_tot',tp,te,it)= sum((cp,s,d),Xip.l(cp,s,d,tp))+sum((ce,s,d),Xie.l(ce,s,d,te));
Result2('surf_tot','sec','moy',it)= sum((cp,s,tp),P1(tp)*Xip.l(cp,s,'d0',tp))+sum((ce,s,te),P2(te)*Xie.l(ce,s,'d0',te));
Result2('surf','tot','moy',it)= sum((cp,s,d,tp),P1(tp)*Xip.l(cp,s,d,tp))+sum((ce,s,d,te),P2(te)*Xie.l(ce,s,d,te));

*~~~~~Re
sult2('consE',tp,te,IT)=consEAU.l(tp,te);
Result2('consE','Tot','moy',IT)=
sum((cp,s,d,tp),P1(tp)*dp(cp,s,d,tp)*Xip.l(cp,s,d,tp))+sum((ce,s,d,te),P2(te)*de(ce,s,d,te)*Xie.l(ce,s,d,te));
Result2('consE','PRIN','moy',IT)= sum((cp,s,d,tp),P1(tp)*dp(cp,s,d,tp)*Xip.l(cp,s,d,tp));
Result2('consE','ETE','moy',IT)=sum((ce,s,d,te),P2(te)*de(ce,s,d,te)*Xie.l(ce,s,d,te));
Result2('consE','PRIN',tp,IT)= sum((cp,s,d),dp(cp,s,d,tp)*Xip.l(cp,s,d,tp));
Result2('consE','ETE',te,IT)= sum((ce,s,d),de(ce,s,d,te)*Xie.l(ce,s,d,te));
Result2('consE',tp,cp,IT)= sum((s,d),dp(cp,s,d,tp)*Xip.l(cp,s,d,tp));

```

```

Result2('consE',te,ce,IT)= sum((s,d),de(ce,s,d,te)*Xie.l(ce,s,d,te));
Result2('consE_moy_ha','prin',cp,IT)$((sum((s,d,tp),Xip.l(cp,s,d,tp))>0)=
(sum((s,d,tp),P1(tp)*dp(cp,s,d,tp)*Xip.l(cp,s,d,tp)))/sum((s,d,tp),Xip.l(cp,s,d,tp)));
Result2('consE_moy_ha','Ete',ce,IT)$((sum((s,d,te),Xie.l(ce,s,d,te))>0)=(sum((s,d,te),P2(te)*de(ce,s,d,te)*Xie.l(ce,s,d,te)))/su
m((s,d,te),Xie.l(ce,s,d,te)));
Result2('consE_moy','prin',cp,IT)= sum((s,d,tp),P1(tp)*dp(cp,s,d,tp)*Xip.l(cp,s,d,tp));
Result2('consE_moy','ete',ce,IT)=sum((s,d,te),P2(te)*de(ce,s,d,te)*Xie.l(ce,s,d,te));

Result3('Dose_S_cp',s,cp,tp,d,IT)=Xip.l(cp,s,d,tp);
Result3('Dose_S_ce',s,ce,te,d,IT)=Xie.l(ce,s,d,te);

*~~~~~

Result4('revenu','tot','moyen',IT)=Z.l;
Result4('revenu','moy','ha',IT)=Z.l/100;
Result4('revenu','tot',cp,IT)=sum((S,d,tp),((p1(tp)*xip.l(cp,s,d,tp))*(RDTp(cp,s,d,tp)*pvp(cp)-
PE*Dp(cp,s,d,tp))))+sum((s,xe.l(cp,s))*(PRp(cp)-COp(cp)));
Result4('revenu','tot',ce,IT)=sum((S,d,te),((p2(te)*xie.l(ce,s,d,te))*(RDTe(ce,s,d,te)*pve(ce)-
PE*De(ce,s,d,te))))+sum((s,xe.l(ce,s))*(PRE(ce)-COe(ce)));
Result4('revenu_typAnn',tp,te,IT)=sum((cp,S,d),(xip.l(cp,s,d,tp)*(RDTp(cp,s,d,tp)*pvp(cp)-PE*Dp(cp,s,d,tp)))) +
sum((ce,S,d),(xie.l(ce,s,d,te)*(RDTe(ce,s,d,te)*pve(ce)-PE*De(ce,s,d,te))))+sum((cp,s),(xp.l(cp,s))*(PRp(cp)-COp(cp)))) +
sum((ce,s),(xe.l(ce,s))*(PRE(ce)-COe(ce)))) + dpu*sum(s,TD(s));
Result4('Prod_typP',cp,tp,IT)=sum((S,d),xip.l(cp,s,d,tp)*RDTp(cp,s,d,tp)) ;
Result4('Prod_typE',ce,te,IT)=sum((S,d),xie.l(ce,s,d,te)*RDTe(ce,s,d,te)) ;
*marge hors DPU

Result5('Marge_Moy',s,cp,IT)= sum((d,tp),((p1(tp)*xip.l(cp,s,d,tp))*(RDTp(cp,s,d,tp)*pvp(cp)-PE*Dp(cp,s,d,tp))))
+(xp.l(cp,s))*(PRp(cp)-COp(cp));
Result5('Marge_Moy',s,ce,IT)=sum((d,te),((p2(te)*xie.l(ce,s,d,te))*(RDTe(ce,s,d,te)*pve(ce)-PE*De(ce,s,d,te))))+
(xe.l(ce,s))*(PRE(ce)-COe(ce));
Result5('Prod','moy',cp,IT)=sum((S,d,tp),(P1(tp)*xip.l(cp,s,d,tp)*RDTp(cp,s,d,tp))) ;
Result5('Prod','moy',ce,IT)=sum((S,d,te),(P2(te)*xie.l(ce,s,d,te)*RDTe(ce,s,d,te))) ;

Result6('Marge_typP',s,cp,tp,IT)=sum(d,(xip.l(cp,s,d,tp)*(RDTp(cp,s,d,tp)*pvp(cp)-PE*Dp(cp,s,d,tp))))
+(xp.l(cp,s))*(PRp(cp)-COp(cp));
Result6('Marge_typE',s,ce,te,IT)=sum(d,(xie.l(ce,s,d,te)*(RDTe(ce,s,d,te)*pve(ce)-PE*De(ce,s,d,te))))+
(xe.l(ce,s))*(PRE(ce)-COe(ce));

*~~~~~

Result7('TERRE_MARGINAL',s) = sum(cp,xp.m(cp,s));
Result7('TERRE_MARGINAL',s) =sum(ce, xe.m(ce,s));
Result7('EAU','MARGINAL') = consEAUmoy.m;

coefNap_sim('ED_coef,IT)=ED*sim(it) ;

option
result1:2
result2:2
result3:2
result4:0
result5:0
result6:0
result7:0
;
Display coefNap_sim, result1,result2,result3,result4,result5,result6,result7;
$libinclude xldump result1 STOCHAST1 Assolement;
$libinclude xldump result2 STOCHAST1 ConsEAU;
$libinclude xldump result3 STOCHAST1 Ajust_Doses;
$libinclude xldump result4 STOCHAST1 Revenu_Prod;
$libinclude xldump result5 STOCHAST1 Marge_Prod;
$libinclude xldump result6 STOCHAST1 Marge_TypA;
$libinclude xldump result7 STOCHAST1 FacProd_Marginal;
$libinclude xldump coefNap_sim STOCHAST1 coefNap_IT;
);

```