



**AGRICULTURE ET CHANGEMENT CLIMATIQUE: ANALYSE
ECONOMIQUE DES STRATEGIES POSSIBLES FACE AUX TENSIONS À VENIR
SUR LES RESSOURCES EN EAU.**

Stage de fin d'année,
pour l'obtention du Master Analyse économique et développement international option
Finances publiques dans les pays en développement et en transition.

Directrice de stage:

Hélène TOUSSAINT

Encadrante:

Elsa MARTIN

Présenté par:

Coulibaly SEYDOU

REMERCIEMENTS

Au terme de ce stage de recherche à Alterre Bourgogne dans le cadre du projet HYCCARE, je tiens à remercier ma directrice de stage Madame Hélène TOUSSAINT et mon encadrante Madame Elsa MARTIN. J'ai beaucoup appris de leur rigueur et de leur goût pour le travail bien fait. La pertinence de leurs observations et critiques et la qualité de leurs différentes suggestions et orientations ont été d'un apport considérable pour la réalisation de ce travail. Les conseils de Madame Elsa Martin en méthodologie de la recherche en économie et en modélisation économique m'ont été très utiles.

Je dis merci à madame Hélène TOUSSAINT qui a tout mis en œuvre pour que je participe au colloque scientifique sur le programme gestion et impacts du changement climatique du ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie, colloque tenu à Paris du 20 au 21 Mai 2014.

Je remercie toute l'équipe d'Alterre Bourgogne qui m'a bien accueilli et facilité mon intégration dans leur cadre de travail que j'ai trouvé convivial.

Je tiens personnellement à dire un grand merci à Monsieur Arnaud VAUTIER et à Madame Youna GIRAULT, tous deux conseillers agricoles de la chambre départementale d'agriculture de la Nièvre. Ils ont apporté une marque d'expertise à ce travail. Non seulement ils nous ont fourni des données et des conseils mais ils sont restés à nos côtés du début jusqu'à la fin.

Je ne saurais oublier l'exploitant agricole qui a bien voulu accepter de nous recevoir dans son exploitation agricole dans le cadre d'une enquête sans laquelle cette étude ne pourrait être réalisée.

Mes remerciements vont également à l'endroit de tous les participants du séminaire scientifique sur le projet HYCCARE tenu le 10 juillet 2014 à Dijon pour leurs observations, critiques et conseils sur les travaux préliminaires de ce mémoire.

Je remercie mes professeurs Madame Céline DE QUATREBARBES et Monsieur Stéphane CALIPEL pour leurs conseils en modélisation et programmation linéaire avec le logiciel GAMS.

Je tiens à remercier particulièrement mon professeur Monsieur Bertrand Laporte qui a bien voulu valider ce stage me permettant ainsi de me plonger pendant 6 mois dans l'univers passionnant de la recherche appliquée en sciences économiques.

Finalement, mes remerciements s'adressent à tous ceux qui, d'une manière ou d'une autre, m'ont apporté une aide quelconque dans la réalisation de ce travail.

SOMMAIRE

INTRODUCTION.....	9
I. CONTEXTE ET CADRE D'ANALYSE	9
1. Contexte	9
a. Cadrage sur l'agriculture en Bourgogne	10
b. Le changement climatique en Bourgogne	12
c. Zone d'études pressenties.....	15
2. Problématique.....	18
3. Revue de littérature	19
a. Les méthodes de modélisation des exploitations agricoles.....	19
a.1. Des modèles agronomiques aux modèles économiques.....	19
a.2. Les techniques de modélisation.....	20
a.2.1. La programmation mathématique.....	20
a.2.2. Les modèles économétriques.....	21
a.2.3. Les modèles d'équilibre général calculables	21
b. Les stratégies d'adaptation au changement climatique	22
II. METHODOLOGIE.....	24
1. Modèle.....	24
a. Spécification du modèle de court terme	24
b. Modélisation de la stratégie d'adaptation à long terme.....	25
c. Hypothèses des modèles.....	26
H1: La rationalité	26
H2: Deux variables de décision: l'allocation des facteurs de production eau et terre..	27
H3: Les contraintes de prélèvement d'eau, d'assolement et de disponibilité du facteur travail.....	27
H4: La contrainte technique de formation des rendements.....	27
H5: La dépendance de la marge brute aux aides de la politique agricole	28
H6: La linéarité des charges liées à l'irrigation.....	28
H7: Raisonnement à conditions économiques constantes.....	28
2. Données	28
a. Méthode de collecte des données	28
b. Présentation des données.....	29
b.1. Approche quantitative	29
b.1.1. Les données d'enquête auprès de l'exploitation agricole retenue.....	29

b.1.2. Les données provenant de la Chambre départementale d’agriculture de la Nièvre.....	31
b.1.3. Les données de pluviométrie du centre de recherche en climatologie de Bourgogne(CRC).	34
b.1.4. Les données en temps de travail de la chambre régionale d’agriculture de Bourgogne	35
b.2. Approche qualitative	36
3. Calibrage des modèles.....	36
a. Valeurs des paramètres de base.....	37
b. Paramétrage de la fonction de contrainte du facteur travail pour le modèle de long terme.....	37
c. Estimation du paramètre de productivité du facteur eau.....	38
III. SIMULATIONS ET PRESENTATION DES RESULTATS	39
1. Simulations.....	39
2. Résultats des simulations	40
a. Résultats des simulations avec le modèle de court terme	40
b. Résultats des simulations avec le modèle de long terme	44
3. Analyses et commentaires des résultats	45
a. Commentaires des résultats du modèle de court terme	45
b. Commentaires des résultats du modèle de long terme	47
IV. LIMITES ET PERSPECTIVES	47
1. Limites.....	47
2. Perspectives	48
CONCLUSION	50
BIBLIOGRAPHIE	51
ANNEXES	54
Annexe1: Données économiques brutes issues de l’enquête	54
Annexe 2: Données économiques de l’exploitation.....	56
Annexe.3: Compte rendu du Skype avec Arnaud VAUTIER, conseiller irrigation à la chambre départementale d’agriculture de la Nièvre.....	57
Annexe 4: Historique des doses hectare par culture de l'exploitation type de Bourgogne Nivernaise.....	59
Annexe 5: Compte rendu d’enquête	60
Annexe 6: Rapport des réponses des différentes simulations réalisées avec le modèle de court terme.....	61
Annexe 7: Rapport des réponses des simulations avec le modèle de long terme	66

LISTE DES TABLEAUX

Tableau 1: Répartition des superficies agricoles sur le Bassin versant de la Tille -----	16
Tableau 2: Volume prélevable et consommation en eau d'irrigation de l'exploitation agricole enquêtée. -----	31
Tableau 3: Données irrigation de l'exploitation agricole enquêtée -----	32
Tableau 4: Données de précipitations saisonnières observées -----	34
Tableau 5: Temps de travail des cultures par chantier -----	36
Tableau 6: Valeurs des paramètres pour le calage du modèle-----	38
Tableau 7: Résultats des simulations pour le calage du modèle de court terme -----	40
Tableau 8: Résultats de la simulation d'une baisse de l'eau de pluie de 20% -----	41
Tableau 9: Résultats de la simulation d'une baisse du volume prélevable de 20% -----	42
Tableau 10: Résultats de la simulation d'une baisse de l'eau de pluie et du volume prélevable de 20% -----	43
Tableau 11 Récapitulatif des résultats des simulations -----	44
Tableau 12: Résultats des simulations pour le calage du modèle de long terme -----	44

LISTE DES GRAPHIQUES

Graphique 1: Recettes des activités agricoles en Bourgogne de 1992-2012.....	11
Graphique 2: Évolution des températures moyennes annuelles en Bourgogne sur la période 1965-2008.....	12
Graphique 3: Évolution des pluies efficaces	14
Graphique 4: Doses hectare par cultures irriguées en Bourgogne Nivernaise	33
Graphique 5: Doses à l'hectare par culture irriguée de l'exploitation enquêtée	33
Graphique 6: Histogramme des résultats des simulations du calage du modèle de court terme	40
Graphique 7: Résultats des simulations du calage du modèle de long terme	45

LISTE DES FIGURES

Figure 1:Orientation technico économique de l'agriculture en Bourgogne.....	10
Figure 2: Carte du Bassin versant de la Tille	16
Figure 3: Cartographie du Bassin versant du Nohain	17

LISTE DES ENCADRES

Encadré 1: Présentation d'Alterre Bourgogne	9
Encadré 2: Présentation du projet HYCCARE	9
Encadré 3: Différences de température moyenne pour la période Avril-Août entre 2003 (« année future ») et 1991(« année actuelle »)	13
Encadré 4: Stratégie de tolérance	23

SIGLES ET ABREVIATIONS

BV	Bassin Versant
COP	Céréales Oléo Protéagineux
CRC	Centre de Recherche en Climatologie de Bourgogne
GICC	Gestion et Impacts du Changement Climatique
GIEC	Groupe Intergouvernemental d'Experts sur l'Évolution du Climat
HYCCARE	Hydrologie Changement Climatique Adaptation et Ressources en Eaux
INOSYS	Innovations Systèmes
INRA	Institut National de Recherche Agronomique
MEGAAF	Modèle d'Équilibre Général de l'Agriculture et l'Agroalimentaire Français
ONERC	Observatoire National de l'Énergie et du Réchauffement Climatique
PAC	Politique Agricole Commune
PMP	Programmation Mathématique Positive
PNACC	Plan National d'Adaptation au Changement Climatique
ROSACE	Réseau d'Observation des Systèmes Agricoles pour le Conseil et les Études
SAU	Surface Agricole Utile
STICS	Stimulateur multidisciplinaire pour les Cultures Standard
SWAT	Soil Water Assessment Tool
ZRE	Zone de Répartition des Eaux

Résumé

Dans ce mémoire, à l'aide d'un modèle de programmation linéaire, nous traitons d'une part de l'impact de la rareté des ressources en eau sur la marge brute de l'exploitation agricole et d'autres part des stratégies que peuvent mettre en œuvre ces exploitations agricoles en vue de faire face au manque d'eau dans un contexte de changement climatique. Nos résultats montrent qu'à court terme, lorsque les assolements sont déjà fixés, la baisse simultanée de 20% du volume d'eau d'irrigation et du volume maximum prélevable entraîne une diminution de 12.67% de la marge brute globale. Cependant, un rationnement du volume d'eau disponible pour l'irrigation entre les cultures irriguées et pluviales permet de réduire la perte de marge brute et constitue dès lors une des stratégies d'adaptation des exploitations agricoles à l'insuffisance de l'eau. En outre, notre modèle économique a montré que la maximisation de la marge brute face à la baisse du volume maximum prélevable pour l'irrigation s'opère en acceptant une perte de rendement moins que proportionnelle à la réduction du volume d'irrigation qu'a engendré la situation de manque d'eau. Ce résultat est en harmonie avec l'une des conclusions de l'observatoire national des effets du réchauffement climatique (ONERC) sur les stratégies d'adaptation de l'agriculture au changement climatique en France.

Mot clés: changement climatique, eau d'irrigation, volume prélevable, stratégies d'adaptations.

Abstract

In this thesis, using a linear programming model we are dealing with a part of the impact of water scarcity on the gross margin of the farm and other share strategies that can implement these farms to cope with the lack of water in a changing climate. Our results show that in the short term, when rotations are already fixed, simultaneous 20% decrease in the volume of irrigation water and the maximum harvestable volume causes a reduction of 12.67% of the overall gross margin. However, rationing volume of water available for irrigation between irrigated and rainfed crops can reduce the loss of gross margin and therefore constitutes an adaptation strategies farms to insufficient water. In addition, our economic model has shown that maximizing the gross margin side to lower maximum harvestable volume for irrigation is done by accepting a loss in yield less than proportional to the reduction in the volume of irrigation has created the situation of water shortage. This result is consistent with one of the conclusions of the National Observatory of the effects of global warming (ONERC) on agricultural adaptation strategies to climate change in France.

Key words: climate change, water irrigation, harvestable volume, adaptation strategies.

INTRODUCTION

Notre stage de fin d'année s'est déroulé du 01 Avril au 20 septembre 2014 à l'agence régionale pour l'environnement et le développement soutenable en Bourgogne (Alterre Bourgogne) à Dijon. Le stage a porté sur le volet vulnérabilité socio économique du projet de recherche Hydrologie, Changement Climatique, Adaptation et Ressources en Eau (HYCCARE). Ainsi, nous consacrons quelques lignes à la présentation de l'entreprise d'accueil (encadré 1) et du projet de recherche (encadré 2) sur lequel le stage s'est effectué.

Notre travail réalise une combinaison des objectifs des deux axes de recherche d'HYCCARE en ce sens qu'il cherche à déterminer d'une part, l'impact économique du changement climatique sur le revenu des exploitations agricoles et d'autres part les stratégies agricoles qui peuvent permettre à ces exploitants d'assurer leurs revenus dans un contexte de rareté de l'eau en raison du changement climatique, c'est à dire de s'adapter. L'axe 1 est relatif à la production de données hydro-climatiques. Il est mené à l'échelle fine des Bassins Versants (BV). Nous nous intéresserons aux activités agricoles de ces secteurs géographiques étudiés.

Encadré 1: Présentation d'Alterre Bourgogne

Crée en 2006 dans le prolongement de l'observatoire régional de l'environnement en Bourgogne qui lui date de 1992, Alterre Bourgogne est l'agence régionale pour l'environnement et le développement soutenable en Bourgogne. C'est une association aux termes de la loi de 1901. Alterre Bourgogne a pour mission d'éclairer les décideurs publics et les acteurs locaux sur les enjeux liés à l'environnement et au développement soutenable par la sensibilisation et la production d'outils d'aide à la décision. Elle propose un appui technique et méthodologique et croise les expertises de différentes disciplines afin d'accroître les connaissances sur le développement durable et de favoriser la vision partagée des enjeux environnementaux. Alterre contribue par ailleurs à fédérer toutes les énergies des différents acteurs du territoire autour des problématiques liées à l'environnement et au développement soutenable en Bourgogne. Alterre Bourgogne est financée en grande partie par l'Etat, le conseil régional, l'Ademe et l'Europe. Aussi, des financements sur projets émanent des partenaires.

Encadré 2: Présentation du projet HYCCARE

Le projet de recherche Hyccare s'inscrit dans le programme de recherche Gestion et Impacts du Changement Climatique GICC-2012 lancé par le Ministère de l'environnement, de l'écologie et du développement durable. Alterre a en charge la coordination de ce projet. Prévu pour trois ans, HYCCARE s'articule autour de deux axes de recherche: le premier axe vise à produire des connaissances sur l'impact du changement climatique sur les ressources en eau à l'échelle de la Bourgogne. Le second axe de recherche s'intéresse aux stratégies d'adaptation au changement climatique et à l'action collective de gestion de l'eau. Pour répondre aux questions soulevées par ces deux axes de recherche, le projet HYCCARE mobilise des chercheurs de plusieurs disciplines issues des sciences physiques comme des sciences économiques et sociales. Ce qui fait de HYCCARE un projet de recherche interdisciplinaire qui regroupe à la fois hydrologues, climatologues, agronomes, sociologues et économistes.

I. CONTEXTE ET CADRE D'ANALYSE

1. Contexte

A l'échelle du globe, le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC, 2007) estime que le changement climatique va entraîner un accroissement des ressources en eau disponibles dans les zones tropicales humides et aux hautes latitudes. Parallèlement il entrainera une diminution des ressources disponibles et une accentuation de la sécheresse aux latitudes moyennes et dans les zones semi arides des basses latitudes. Ainsi, selon le GIEC (2007) des centaines de millions de personnes seront exposées à un stress hydrique accru.

En France, selon le plan national d'adaptation au changement climatique PNACC (2010) l'un des gros défis à relever sera de faire converger une offre de ressources en eau qui diminue avec une demande qui augmente du fait des réchauffements climatiques. PNACC (2010) précise donc que le changement climatique affectera les secteurs comme la forêt, l'agriculture, la pêche, le tourisme et l'aménagement du territoire. Par ailleurs, Le secteur agricole, principal usager de la ressource en eau, sera tout particulièrement affecté par l'impact du changement climatique (Brisson et Levraut, 2010).

C'est dans le même contexte que Amigues et al (2006) mettent en avant l'idée selon laquelle « L'agriculteur et l'éleveur sont les premières victimes de la sécheresse puisque l'agriculture non irriguée représente plus de 90% de la SAU¹. [en France] Aider l'agriculture à s'adapter, c'est lui permettre d'être rentable tout en veillant à la meilleure utilisation collective de l'eau, en partageant de façon non conflictuelle la ressource en eau avec les autres acteurs de la société ». Pour eux, l'adaptation au changement climatique passe par l'optimisation de l'utilisation de l'eau et cela en harmonie avec les autres usages. Avec le changement climatique, les besoins en eau d'irrigation des cultures seront de plus en plus immenses. Il faudra trouver de l'eau pour irriguer les cultures afin d'assurer les rendements.

Mais qu'en est-il dans le cas de l'agriculture Bourguignonne? Que sait-on du changement climatique aujourd'hui en Bourgogne?

a. Cadrage sur l'agriculture en Bourgogne

La Bourgogne est une région à dominante rurale et agricole. En Bourgogne, les grandes cultures (céréales et oléo protéagineux en jaune sur la carte ci contre) dominant sur les plateaux à l'orientation nord-est, sud-ouest de l'Yonne et également dans les plaines à l'est et au nord du département de l'Yonne. Le colza constitue la tête d'assolement sur les plateaux à faible potentiel agronomique.

En 2012, les céréales et oléo-

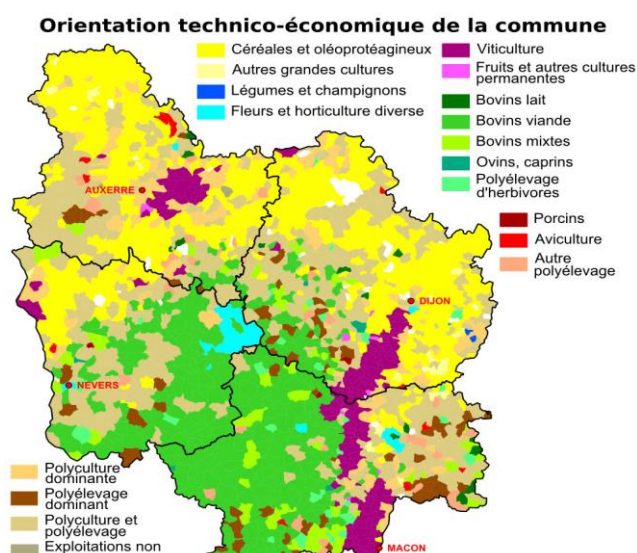


Figure 1: Orientation technico économique de l'agriculture en Bourgogne

¹ Surface agricole utile, c'est la surface foncière utilisée par les exploitants agricoles pour la production agricole.

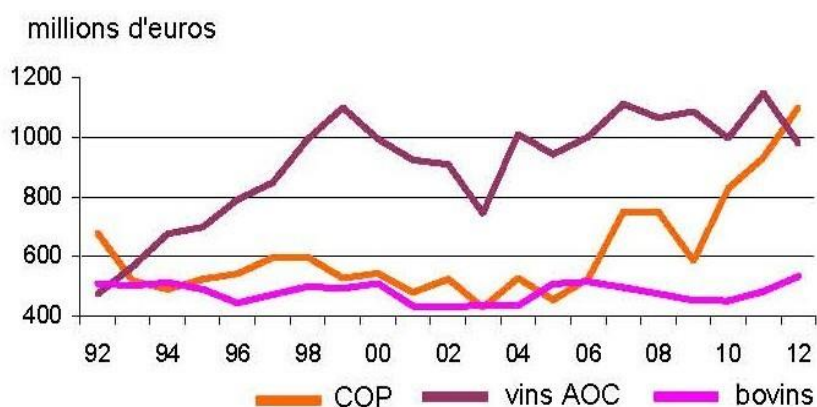
protéagineux (COP) couvraient 48% de la surface agricole utile. (Agreste Bourgogne, 2013) Ce qui place la Bourgogne dans les premiers rangs français pour les orges et le colza. Toutefois, Les rendements en céréales sont inférieurs à la moyenne française. Par exemple le rendement du blé en 2012 était 66 q/ha en région contre 73 q/ha en France. (Agreste Bourgogne, 2013).

Une autre production importante pour la Bourgogne est la viticulture. Elle occupait 31 890 ha en Bourgogne en 2012. Cette activité représente environ 1/3 de la valeur de la production agricole de la région et des emplois agricoles Bourguignons.(Agreste Bourgogne,2013).

La 3^{ème} orientation agricole de la région est l'élevage allaitant (destiné à la boucherie).

En 2012, la Bourgogne occupait la 2^{ème} place en France par son effectif de vaches allaitantes. L'élevage se concentre au sud et à l'ouest de la région où les prairies permanentes occupent 43% de la SAU de la région. (Agreste Bourgogne, 2013).

Le graphique 1 ci-dessous indique les recettes tirées des activités de production des COP, du vin et de l'élevage de bovins sur la période 1992-2012 en Bourgogne.



Graphique 1: Recettes des activités agricoles en Bourgogne de 1992-2012

Source: Agreste Bourgogne, 2013.

Le graphique indique une augmentation rapide des recettes de COP de l'année 2009 à 2012. Ces recettes de COP ont dépassé le niveau de plus de 1000 millions d'euro en 2012. Les recettes tirées de l'élevage bovin n'a pu excéder la barre de 500 millions d'euros de 1992 jusqu'en 2012. Globalement sur toute la période les recettes du vin sont supérieures aux recettes de COP et de l'élevage bovins avec un niveau de recette maximal de près de 1200 millions d'euro réalisée en 2011.

Selon Agreste Bourgogne (2012), « *Les grandes cultures gagnent du terrain en Bourgogne* ». Entre 2000-2010, elles sont passées de 33 à 36% de la SAU (Agreste Bourgogne, 2010). En outre, la période 2009-2012 a enregistré une augmentation rapide des recettes des COP (voir graphique 1).

Dans cette étude, nous nous intéresserons aux grandes cultures en raison de leur place en Bourgogne. Un autre élément justifiant notre choix de travailler sur les exploitations de grandes cultures est que celles-ci en Bourgogne sont particulièrement sensibles à l'orientation de la politique

agricole commune. Les aides directes au titre de la PAC concernent plus des 9/10^{ème} de la surface agricole régionale.(Agreste Bourgogne, 2012).

Donc mener une étude sur ces exploitations agricoles dans le cadre du changement climatique pourrait permettre de jeter les bases d'une réflexion sur la contribution de l'outil européen qu'est la politique agricole commune aux efforts locaux d'adaptation au changement climatique.

Après ces différents éléments de cadrage sur l'agriculture Bourguignonne, voyons ce qui est aujourd'hui du changement climatique en Bourgogne.

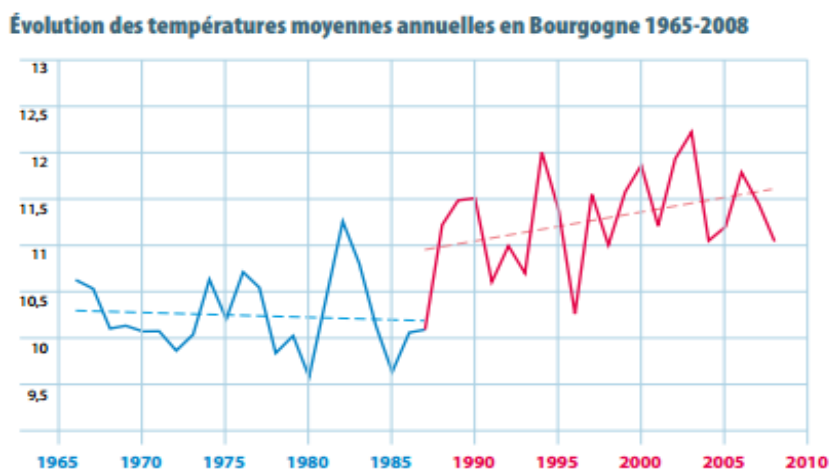
b. Le changement climatique en Bourgogne

Le changement climatique pourrait entraîner une élévation moyenne de la température en France (Brisson, 2010). On ne connaît à l'heure actuelle que les grandes tendances: températures à l'horizon 2050.

A l'échelle de la Bourgogne, plusieurs niveaux d'informations sont disponibles

➤ **Les données fournies par le centre de recherche en climatologie de l'université de Bourgogne(CRC).**

Selon les chercheurs du CRC cité par Alterre Bourgogne (2009), une augmentation moyenne des températures de 1.5°C est déjà observée depuis deux décennies en Bourgogne.



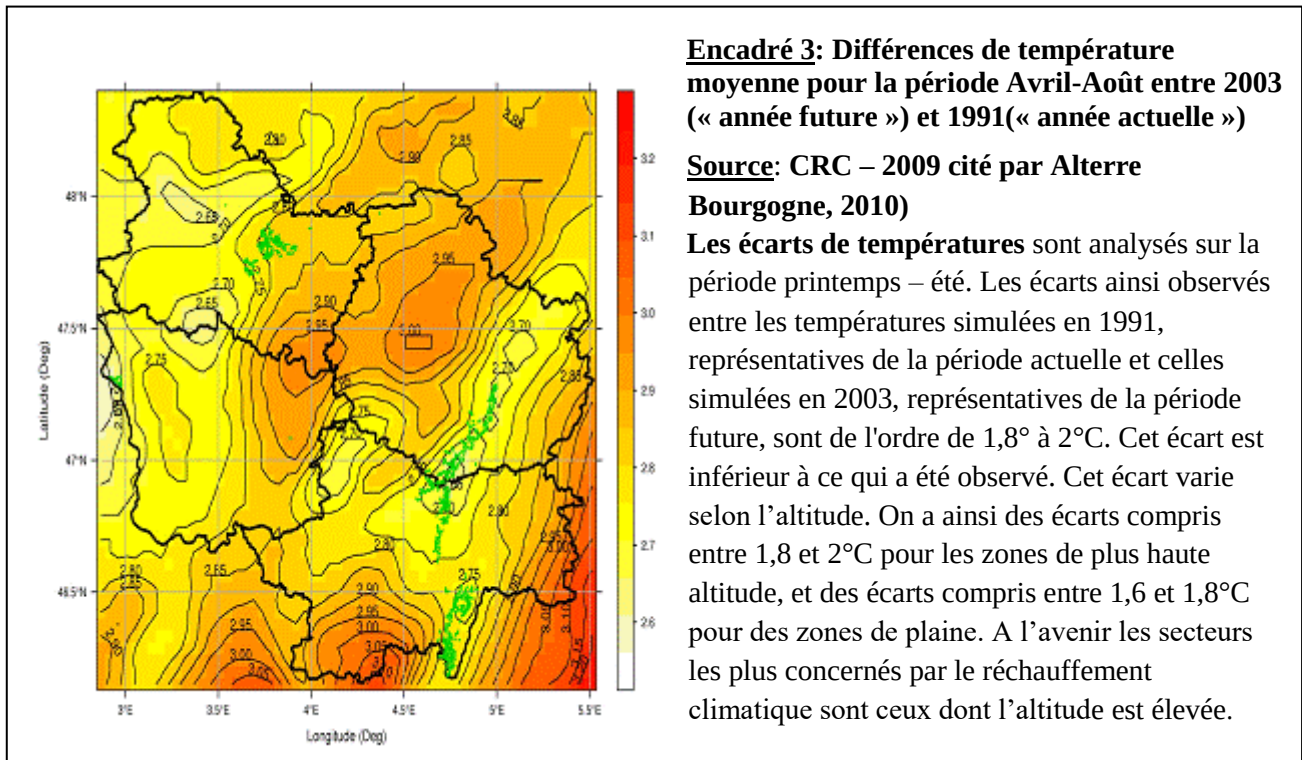
Graphique 2: Évolution des températures moyennes annuelles en Bourgogne sur la période 1965-2008

Source: CRC cité par Alterre Bourgogne (2009).

Le graphique 2 montre que les plus hautes températures en Bourgogne sur la période 1965-2010 ont été enregistrées dans les deux dernières décennies 1990-2000 et 2000-2010 avec un niveau de température atteignant 12.25°C aux alentours de l'année 2003.

En Bourgogne, depuis 1985, les températures annuelles moyennes ne sont plus retombées en dessous de 10°C.

Des simulations ont été effectuées en 2009 par le CRC à une échelle fine, 9 km (la maille de 3 km est travaillée actuellement dans HYCCARE). Elles montrent que la Bourgogne pourrait connaître des élévations moyennes de la température entre 2,6 et 3°C pendant les mois chauds avec un climat futur du type de 2003 (Alterre Bourgogne, 2009). Des différences infrarégionales ont été mises en évidence et sont conformes à d'autres observations (voir encadré 3 ci-dessous)



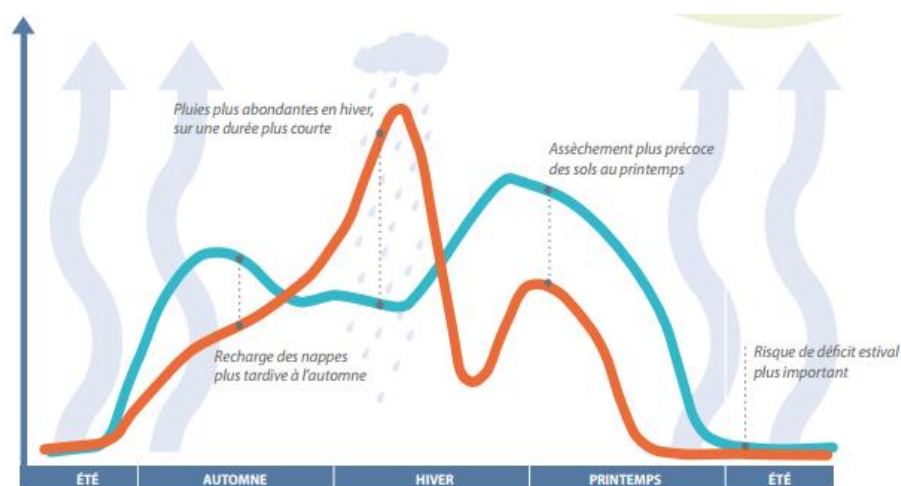
Selon l'ensemble de la communauté des climatologues, l'évolution des précipitations est quant à elle plus difficile à connaître.

Les chercheurs estiment que les précipitations pourraient augmenter légèrement mais avoir une répartition annuelle plus contrastée qu'aujourd'hui. Les précipitations moyennes en Bourgogne sont comprises entre 700 mm et 1000mm. On s'attend à ce que les précipitations futures pourraient se concentrer davantage sur la saison froide et les étés pourraient accuser des sécheresses plus fréquentes. Le graphique 2 illustre bien ces prédictions du CRC en montrant l'évolution des pluies efficaces à partir de deux exemples : une année d'aujourd'hui et une année de demain. Les pluies efficaces sont la différence entre les précipitations et l'évapotranspiration.

Pluies efficaces = Précipitation – Évapotranspiration

L'évapotranspiration désigne la quantité d'eau rejetée dans l'atmosphère par l'évaporation du sol et la transpiration des plantes.

Pluies efficaces (mm)



Graphique 3: Évolution des pluies efficaces

Source: CRC cité par Alterre Bourgogne (2009).

Le graphique 3 montre que demain, les pluies efficaces seront très faibles en été, ce qui pourrait accentuer le risque de déficit hydrique estival. Toutefois, demain, nous aurons des pluies abondantes en hiver mais ce ne sera que sur une courte durée. Comparativement à aujourd'hui, la baisse relative du niveau des pluies demain entraînerait un assèchement plus précoce des sols au printemps.

Le problème majeur pourrait être celui de la variabilité annuelle des pluies, ce qui rendrait plus difficile les choix des agriculteurs quant à la conduite de leurs cultures.

➤ Les informations issues des travaux de recherche du projet climator (Brisson et Levraut, 2010).

Brisson et Levraut (2010) dans le cadre du projet climator analysent les manifestations, les impacts du changement climatique sur l'agriculture et la forêt en France. Pour la région Bourgogne, leurs conclusions montrent qu'avec l'élévation de la température moyenne qu'entraînerait le changement climatique, les besoins en chaleur des plantes seront vite satisfaits, ce qui entraînera l'avancée des dates de récoltes. Dans le département de Saône et Loire par exemple, en 2011, la floraison des céréales est intervenue avec 15 jours d'avance depuis 15-20 ans. (Brisson et Levraut, 2010).

« Globalement, la communauté scientifique estime que les impacts les plus importants sur la ressource en eau auront lieu en été: l'augmentation des températures stimulera l'évapotranspiration qui se conjuguera avec la diminution des précipitations pour conduire à un assèchement des sols. Aussi, même dans les régions où les précipitations ne diminueront pas, voire augmenteront légèrement, la disponibilité en eau pourra devenir plus irrégulière. Et des pénuries d'eau pourront se faire sentir ponctuellement dans des régions qui n'en souffrent pas actuellement » (Alterre Bourgogne 2009)

Toujours à l'échelle de la Bourgogne, les sols séchants et /ou superficiels (plateaux calcaires et sol sableux, caractéristiques des sols de la Tille et de la Saône en région Bourgogne) sont sensibles au stress hydrique d'humidité et risquent d'être pénalisés à l'avenir (Alterre Bourgogne, 2012). Les cultures étant sensibles au stress hydrique surtout pendant la phase de formation des grains, des

baisses de rendements sont à craindre. La baisse des rendements dépendra du stade de croissance de la plante, du moment où intervient le déficit hydrique (Amigues et al., 2006)

L'insuffisance de l'eau à des périodes clés du cycle cultural, donc à des périodes de fortes demandes en eau des plantes fait apparaître un défi majeur. En effet, cette situation pourrait entraîner des déséquilibres chroniques entre besoin en eau à usage agricole (irrigation) et disponibilité de l'eau. En conséquence, les pouvoirs publics vont intervenir pour réglementer les prélèvements en eau d'irrigation afin de prévenir les conflits d'usage de l'eau et sauvegarder l'équilibre de l'écosystème.

Aujourd'hui déjà, cette intervention publique consiste à allouer un volume maximal d'eau d'irrigation à chaque agriculteur à chaque début de campagne agricole.

Dans les faits, ces volumes attribués couvrent aujourd'hui très largement les utilisations réelles. Ils équivalent à un droit de tirage. Mais ces allocations ne constituent pas une garantie d'approvisionnement en eau d'irrigation pour l'agriculteur. C'est pourquoi, en cas de sécheresse avérée, l'irrigation peut être interrompue par arrêté préfectoral, phénomène qui risque d'être plus fréquent avec le changement climatique; d'où l'étude.

Les exploitations agricoles auront donc à faire face à une contrainte en eau d'irrigation en plus des autres contraintes qui prévalent dans l'activité agricole. Lorsqu'un BV fait l'objet de mesures pour répartir les usages de l'eau entre utilisateurs, on dit qu'il est inscrit en Zone de Répartition des Eaux (ZRE).

c. Zone d'études pressenties

Notre étude s'est initialement intéressée à deux BV faisant l'objet de simulations hydro climatiques dans le cadre d'HYCCARE, et où l'irrigation est déjà bien présente, le BV de la Tille et le BV du Nohain.

Le BV de la Tille est inscrite en ZRE depuis 2010. Cela témoigne du déséquilibre chronique de l'offre et de la demande en eau sur ce BV. En clair, les besoins en eau à usage agricole n'ont pu être satisfaits sur longues périodes compte tenu de l'eau disponible dans les ressources hydriques. Par conséquent, avec l'inscription en ZRE, les prélèvements en eau peuvent être suspendus en fonction de l'évolution critique des périodes de sécheresse. Les agriculteurs du BV de la Tille s'interrogent donc sur comment ils doivent s'y prendre pour assurer leur revenus face à cette situation d'incertitude.

Le BV de la Tille avec une population de plus de 77042 habitants en 2006, est situé en Bourgogne en Côte d'Or. La Tille, principale rivière du BV et ses affluents drainent un bassin de plus de 1300 km². Une petite partie au nord du BV de la Tille est située en Haute Marne dans la région Champagne-Ardenne.(Duprez et al.,2010).

Le BV de la Tille est recouvert pour près de 50% de sa superficie, de terres agricoles (Duprez et al., 2010).

La répartition précise des superficies agricoles sur le BV de la Tille (en ha et en %) est donnée par le tableau ci-dessous:

Cultures	Surface agricole du bassin versant de la Tille(en ha)	Part de la surface agricole totale de la Tille en %
Blé tendre	21105	37
Orge et escourgeon	12021	21
Oléagineux	13403	24
Superficie fourragères	10016	18
Mais grain et mais semence	153	0
Total	56698	100

Tableau 1: Répartition des superficies agricoles sur le Bassin versant de la Tille

Source: Données AGRESTE citées par (Duprez et al., 2010).

Le tableau 1 montre que le blé occupe la plus grande partie de la surface agricole du BV de la Tille avec 40% de la surface agricole totale. Les oléagineux arrivent en deuxième position avec 24% de la surface agricole utile. La surface agricole totale du BV de la Tille est de 56698 ha.

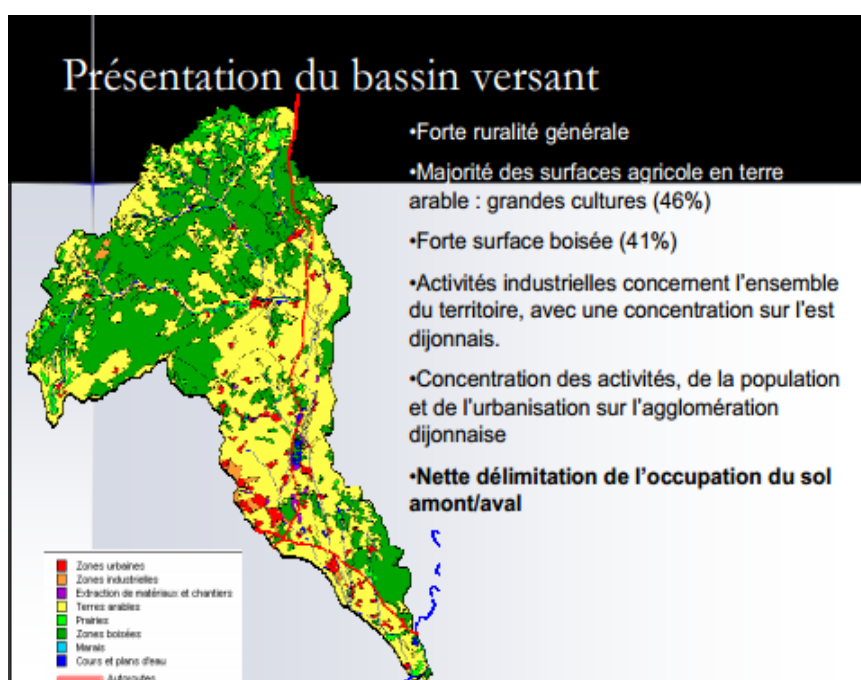


Figure 2: Carte du Bassin versant de la Tille

Source : Sitiv contrat de bassin Tille <http://chaignay.fr/sitiv.pdf>.

La surface arable occupée par les grandes cultures représente 46% de la surface totale du BV de la Tille. Sur la carte, les surfaces arables sont en jaune. La surface en bois occupe 41% de la surface totale du BV de la Tille. Les surfaces occupées par le bois sont coloriées en vert sur la carte.

Le BV du Nohain, quant à lui, n'est pas inscrit en ZRE. L'irrigation y est fortement pratiquée. C'est pourquoi, nous avons jugé utile d'anticiper sur cette zone le choc climatique à venir afin de prévenir les dégâts en proposant des stratégies d'adaptation efficaces ou d'examiner dans quelles mesures ce choc climatique pressenti peut être une opportunité pour certaines activités agricoles. En effet, Reilly (2002) soutenait que « *si tout changement peut être une opportunité pour les agriculteurs qui s'y sont préparé, il constitue une menace pour ceux qui n'ont pas réussi à s'adapter* ». Par ailleurs, Vert, Schaller et Villien (2013) précisent que « *les problèmes de demain seront plus maîtrisables s'ils sont convenablement imaginés dès aujourd'hui* ».

Plus précisément, le BV du Nohain est situé dans le département de la Nièvre. Ses cours d'eaux cumulent 45 km sur 530 km². Le BV du Nohain fait partie d'une des petites régions agricoles de la Nièvre, la Bourgogne Nivernaise, une des meilleures en termes de potentiel des cultures. L'irrigation y est très présente avec la culture de maïs. Dans la Nièvre, 1/3 de la SAU est couvert par les céréales et oléagineux, les surfaces irriguées représentent 5000ha pour 126 irrigants. Les principales cultures pratiquées sont le maïs, le blé, l'orge, le colza et le tournesol. (Source: Chambre d'agriculture de la Nièvre [en ligne]).

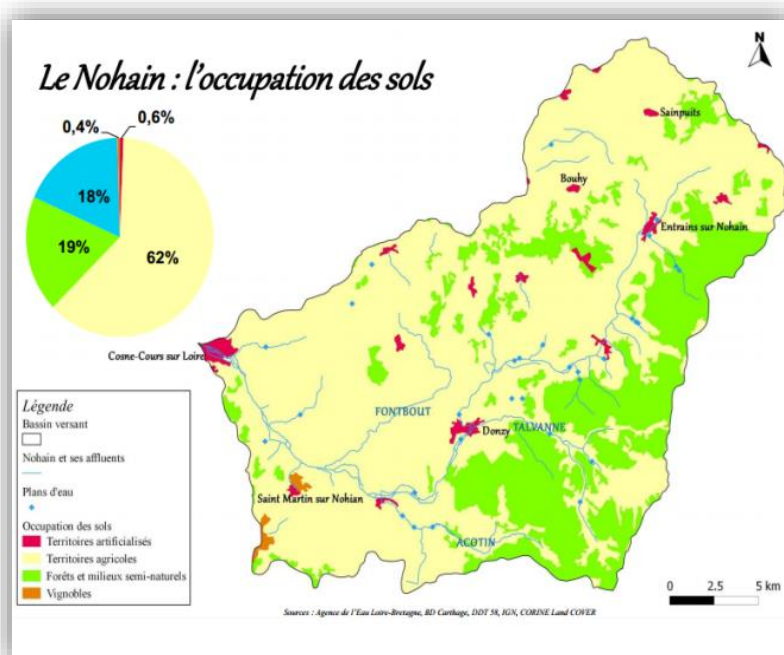


Figure 3: Cartographie du Bassin versant du Nohain

Source: Pays Bourgogne Nivernaise (2013).

http://bourgognenivernaise.files.wordpress.com/2013/03/2013_03_05-prc3a9sentation-rc3a9union-nohain.pdf.

La surface agricole représente 62% de la surface totale du BV du Nohain. C'est la partie en jaune sur la carte. Les forêts et milieux naturels (partie en vert sur la carte) occupent 19% de la surface totale du BV du Nohain.

2. Problématique

Les effets du changement climatique sur l'agriculture sont identifiés et presque reconnus par tous aujourd'hui.

L'assèchement des sols en raison de températures fortes pourrait entraîner aussi une intensification de l'irrigation (Ducharne, 2012). Comme indiqué par Brisson et Levrault (2010), nous risquons plus spécifiquement d'assister à une augmentation des besoins en eau d'irrigation des cultures d'été. Cette hausse des besoins en eau d'irrigation des cultures d'été combinée à la baisse des précipitations au cours de la même saison entrainera une insuffisance quantitative de la ressource en eau.

Constatant l'insuffisance quantitative chronique de la ressource en eau par rapport aux besoins, les pouvoirs publics (les préfets) vont devoir intervenir

Afin d'assurer une gestion plus fine des demandes de prélèvement en eau, les seuils de prélèvement pourront être abaissés ou les prélèvements d'eau à usage agricole interdits: Cela se traduira par une mesure du type de l'inscription en Zone de Répartition des Eaux(ZRE) du territoire concerné par cette situation de déséquilibre entre disponibilité et besoins de la ressource en eau. Par arrêté préfectoral Le BV de la Tille est inscrit en ZRE depuis 2010. Cette intervention publique est en harmonie avec les prescriptions de la directive cadre sur l'eau de l'Union Européenne. La directive cadre sur l'eau adoptée en 2000 par l'Union Européenne recommande à chaque Etat membre de prévenir le « bon état écologique » des ressources en eau à l'horizon 2015. (Commission Européenne, 2000). L'expression « bon état écologique » prend en compte à la fois la dimension quantitative et qualitative des ressources en eau.

Il est indéniable que les agriculteurs devront s'adapter aux nouvelles conditions climatiques marquées par des épisodes de sécheresse et par des mesures réglementaires telles la réduction des seuils de prélèvement ou d'interdiction de prélèvement de l'eau pour l'irrigation. Cependant les stratégies agricoles pour faire face aux conséquences du changement climatique demeurent peu explorées. En effet, avec le changement climatique, les agriculteurs vont vouloir irriguer davantage pour assurer leur production, ce qui entrainera des tensions supplémentaires sur les ressources en eau. Il faudra rechercher de l'eau, et des conflits risquent d'apparaître.

Comment les agriculteurs vont-ils faire face à ces nouvelles contraintes liées à la rareté de l'eau en raison du changement climatique? Et comment s'ajusteront-ils à des interdictions d'arrosage possibles au moment des forts besoins des cultures ?

Au final, quelles sont les stratégies d'adaptation des exploitations agricoles face à la sécheresse dans un contexte de changement climatique ?

Pour apporter des éléments de réponse, notre étude se construit selon 2 objectifs:

- ✓ Estimer par modélisation l'incidence de la réduction de l'eau de pluie et/ou du volume d'eau prélevable pour l'irrigation sur le revenu d'un exploitant agricole
- ✓ Et analyser d'un point de vue économique les stratégies d'adaptation de l'exploitant agricole dans une situation de rareté de l'eau comme le laisse supposer l'évolution du climat.

3. Revue de littérature

Plusieurs méthodes de modélisation des exploitations agricoles existent dans la littérature en économie agricole. Dans cette partie, nous présenterons quelques unes. Par ailleurs, nous exposerons les diverses stratégies d'adaptation au changement climatique présentes dans la littérature.

a. Les méthodes de modélisation des exploitations agricoles.

La littérature en économie agricole présente plusieurs types de modèles selon l'échelle d'étude et la technique de modélisation (voir Boussard et al, 1997; Graveline et al, 2009).

Nous procédons à une revue de littérature des méthodes et des objectifs poursuivis en modélisation économique des exploitations agricoles.

a.1. Des modèles agronomiques aux modèles économiques

Les objectifs poursuivis en économie agricole au travers de la modélisation sont multiples. Les différents travaux s'intéressent entre autres à l'évaluation ou à l'estimation de l'impact des différentes politiques publiques sur l'offre de produits agricoles, sur le revenu agricole et sur l'environnement.

Loubier (2003) propose de distinguer les modèles positifs et les modèles normatifs

Les modèles positifs visent à décrire et à expliquer les usages que font les agriculteurs de leurs ressources financières, naturelles et humaines. Les modèles positifs sont généralement construits à l'échelle de l'exploitation ou de la parcelle. Ces modèles visent deux objectifs majeurs « *analyser la rationalité socio-économique des choix réalisés par les agriculteurs pour éventuellement proposer des itinéraires techniques plus efficaces et fournir un outil d'aide à la gestion tactique des exploitations* » (Loubier, 2003).

Les modèles positifs sont généralement essentiellement basés sur des paramètres biophysiques. Ce sont des modèles multi périodiques à pas de temps courts qui sont en mesure de prendre en compte les processus agronomiques, chimiques, hydrologiques, et hydrogéologique.

Plusieurs modèles positifs existent dans la littérature, mais, nous ne présenterons que le modèle MODERATO qui est un modèle d'aide à la gestion à un pas de temps journalier.

Bergez et al. (2002) ont construit et utilisé le modèle MODERATO pour étudier la marge brute d'exploitations irriguante dans le Sud-ouest de la France et ils ont montré qu'une optimisation des calendriers d'arrosage pouvait permettre un accroissement de la marge brute de 100euro/ha tout en réduisant la consommation d'eau de 30% et les rendements de 10%.

« *La seconde catégorie de modèles dit modèles normatifs a pour objectif principal d'analyser les conditions d'adaptation à des chocs exogènes. Ils peuvent être utilisés soit de manière exploratoire en tant qu'outils d'analyse prospective à long terme soit pour simuler les impacts d'ajustement nécessaires à court ou moyen terme* ». (Loubier, 2003)

Reynaud (2006) a par exemple étudié l'impact d'épisodes de sécheresse sur la marge brute du producteur. Il a également analysé les stratégies d'adaptation de cet agriculteur aux épisodes de sécheresse en utilisant un couplage de modèle agronomique de croissance de plante (STICS) et de

modèle économique d'optimisation du comportement de l'agriculteur en univers incertain à l'aide des données de la région Midi Pyrénées.

Contrairement aux modèles positifs qui mobilisent beaucoup de données biophysiques, les modèles normatifs en requièrent peu mais nécessitent que soit pris en compte le comportement économique de l'agriculteur (Ruben et al., 1998). Nous construirons un modèle de ce type afin de nous concentrer sur la dimension économique de l'analyse.

a.2. Les techniques de modélisation

La modélisation économique des exploitations agricoles fait principalement appel à la programmation mathématique (linéaire et non linéaire), à l'économétrie, aux modèles d'équilibre général calculable sur lesquels nous allons rapidement revenir.

a.2.1. La programmation mathématique

« Les méthodes de programmation mathématique sont très largement utilisées en économie agricole pour modéliser le comportement économique des agriculteurs. Ces méthodes consistent généralement à maximiser une fonction objectif telle que la marge brute, le profit ou le revenu des exploitations sous un ensemble de contraintes; ou bien minimiser des coûts (y compris environnementaux parfois) pour un revenu d'exploitation donné » (Loubier, 2003)

Avant la phase de modélisation, en vue de simplifier la représentation des exploitations, il est judicieux de sélectionner une exploitation-type, c'est à dire une exploitation représentative d'un ensemble d'exploitations qui ont la même structure de production, les mêmes cultures principales, les mêmes stratégies et les mêmes contraintes (Kobrich et al., 2003). C'est généralement sur la base de cette représentativité qu'on engage la collecte de données pour alimenter le modèle.

« Les modèles de programmation linéaire ou non sont généralement des modèles statiques au sens où l'on considère que les exploitations maintiennent leur taille, leur technologie et leur capacité de production sur la période de simulation considérée » (Loubier, 2003)

Cette représentation statique trouve sa principale justification dans la complexité à représenter la diversité des stratégies d'investissement des agriculteurs concernant les infrastructures et les équipements (Berntsen et al., 2003).

Pour effectuer ces différents travaux, deux types de programmation mathématique existent dans la littérature: la programmation mathématique linéaire et la programmation mathématique non linéaire.

La programmation linéaire est un cas particulier des modèles de programmation mathématique où la fonction objective et les contraintes sont spécifiées de manière linéaire par rapport aux variables de décision.

Généralement on considère comme variables de décision les surfaces allouées à chaque culture et/ou le type et le nombre d'animal d'élevage. La fonction objectif correspond très souvent à la marge brute globale, c'est-à-dire la marge brute associée aux variables de décision. Quant aux contraintes, elles peuvent être agronomiques, économiques, financières, techniques ou réglementaires.

La technique de programmation linéaire appliquée aux exploitations agricoles nécessite donc des données réelles qui généralement sont collectées par enquête auprès des agriculteurs identifiés comme exploitations-types.

La capacité du modèle à reproduire le comportement des exploitations agricoles-types dépend de la fiabilité et de l'exhaustivité des données recueillies.

La programmation mathématique non linéaire encore appelée programmation mathématique positive (PMP) consiste à exprimer soit la fonction objectif de façon non linéaire, soit à exprimer les contraintes de façon non linéaire. Brady (2003) a par exemple utilisé un modèle de PMP pour étudier l'efficacité des politiques de contrôle des pollutions sur des exploitations agricoles du sud de la Suède.

Nous n'utiliserons pas un modèle de programmation mathématique positive pour modéliser les stratégies d'adaptation des exploitations agricoles face à la sécheresse par souci de simplification de l'analyse.

Tous les modèles économiques de programmation mathématique reposent sur l'idée que les agents économiques, les agriculteurs dans notre cas sont rationnels. Ils cherchent à maximiser un revenu (marge brute) ou à minimiser des coûts sous différentes contraintes.

a.2.2. Les modèles économétriques

Les modèles économétriques servent également à modéliser le comportement des exploitations agricoles. Ces modèles cherchent à analyser l'impact de variation de prix de facteurs de production comme la terre, ou bien l'impact des variations du prix des produits agricoles. Ces modèles permettent aussi d'analyser l'impact de nouvelles contraintes ou de l'abandon de certaines contraintes (quota, taxes,...).

Les modèles économétriques sont aussi utilisés pour analyser l'impact des politiques de subvention de la PAC, ou encore des politiques de contrôle de l'érosion des sols et de la pollution.

Les modèles économétriques peuvent être mis en œuvre à l'échelle de plusieurs exploitations, c'est à dire d'une région voire d'un pays. Mais l'inconvénient avec les modèles économétriques est qu'il faut disposer d'une longue série de données passées pour éviter que la faiblesse du nombre total des observations réduise la crédibilité des résultats issus des estimations économétriques. Ne disposant pas d'une telle série, nous n'aurons pas recours à la modélisation économétrique.

a.2.3. Les modèles d'équilibre général calculables

Les modèles d'équilibre général calculable peuvent servir à l'analyse de l'impact macroéconomique d'un choc sur un secteur d'activité donné (voir par exemple Boccanfuso et al., 2014). En outre, ils permettent de modéliser les effets des adaptations d'une branche d'activité sur l'ensemble de l'économie.

En France par exemple, l'INRA a mis au point un modèle d'équilibre général calculable de l'agriculture et de l'agroalimentaire français (MEGAAGF). Il permet de modéliser les impacts de réformes des politiques agricoles sur différentes filières ainsi que les effets d'une réduction

d'utilisation d'engrais minéraux en France (voir par exemple Gohin et al., 1999 ou Gohin, 2002). Par souci de simplification, nous nous concentrerons sur une analyse en termes d'équilibre partiel.

La plupart des modèles de programmation mathématique traitent séparément les objectifs économiques et les objectifs environnementaux. Soit les objectifs économiques sont insérés dans la fonction objectif et les objectifs environnementaux pris comme des contraintes. Soit les objectifs environnementaux sont intégrés dans la fonction objectif et cette fois les objectifs économiques deviennent des contraintes.

Les solutions obtenues de tels programmes peuvent être qualifiées de solutions non optimales du point de vue social car ne considérant simultanément les objectifs économiques et environnementaux.

Pour tenir compte de cet aspect, il est possible d'intégrer dans la fonction objectif, les objectifs économiques et environnementaux. Par exemple, Flichman et al. (1999) utilisent un modèle bioéconomique pour analyser l'impact de la politique de conservation des eaux et du sol sur une exploitation agricole Tunisienne. Leur modèle économique est un modèle de programmation non linéaire multicritère car ils intègrent dans la fonction objectif deux objectifs: la maximisation de l'espérance du revenu net actualisé et la minimisation des pertes de sols causées par l'érosion.

Le principal obstacle à ce type de travaux est qu'il est difficile d'avoir une valeur monétaire des avantages et dommages environnementaux, et même lorsque ces valeurs sont disponibles, elles sont associées à des marges d'incertitudes considérables (Loubier, 2003). Pour cette raison, nous nous concentrerons sur la dimension économique.

Dans la plupart des modèles de programmation mathématique d'économie agricole, le programme de l'exploitant agricole se résume en une maximisation de sa marge brute globale sous contrainte de la disponibilité des facteurs de production. L'étude des stratégies d'adaptation au changement climatique nécessite de dépasser ce cadre analytique.

b. Les stratégies d'adaptation au changement climatique

La littérature en économie agricole présente principalement trois grandes stratégies d'adaptation des exploitations agricoles à la limitation de l'eau d'irrigation dans un contexte de changement climatique (Graveline et Mérel, 2014):

- ✓ **La stratégie d'esquive** qui consiste à réduire le cycle cultural en avançant les dates de semis est appelée la stratégie d'esquive. Elle permet à la plante d'éviter les périodes de forte sécheresse en achevant le cycle cultural avant celle-ci ou en évitant la coïncidence entre la phase de floraison ou de remplissage des grains et la sécheresse. Ce sera notamment le changement de matériel végétal: il s'agit de cultiver des espèces végétales génétiquement travaillées afin de résister au stress hydrique.

- ✓ **La stratégie d'évitement** qui équivaut à rationner les besoins des cultures. Elle consiste à faire l'économie de l'eau en diminuer les apports d'eau pendant la phase de végétation de la plante afin de conserver une partie de la ressource pour les périodes critiques (floraison, remplissage des grains). Elle permet d'optimiser l'utilisation de l'eau, c'est-à-dire de pratiquer l'irrigation en réduisant le gaspillage et la perte d'eau au cours de l'irrigation.
- ✓ **La stratégie de tolérance qui consiste** à revoir les assolements en s'orientant vers des cultures moins consommatrices d'eau (voir encadré 4 ci contre)

L'Observatoire National de l'Energie et du Réchauffement Climatique ONERC (2009) propose dans le cadre de l'adaptation de l'agriculture au changement climatique une diversification des systèmes de cultures permettant de combiner les stratégies d'esquive, d'évitement et de tolérance.

Encadré 4: Stratégie de tolérance

L'idée est de chercher à utiliser les espèces végétales qui résistent mieux à la contrainte hydrique et qui sont tolérantes vis-à-vis de la rareté en eau. Il existe en Australie et en Inde des variétés de blé supportant 35 °C (Campariol, 2009). On peut aussi utiliser des variétés plus précoces afin d'éviter des fins de cycle trop difficiles (Gate et al. 2011). Enfin, on peut rechercher des variétés capables de récupérer rapidement après un stress (Campariol, 2009).

Dans le même ordre d'idée, il semble judicieux de privilégier les cultures d'hiver afin d'éviter le stress hydrique printanier et estival (Alterre Bourgogne, 2012). Le tournesol et l'orge pourraient être une alternative au maïs et au blé, car moins consommateurs d'eau.

De nouvelles espèces pourraient aussi être implantées comme le sorgho, moins gourmand en eau que le maïs. En effet, le sorgho accepte des conditions de culture plus rustiques que la culture du maïs. Le sorgho accepte également des sols à moindre réserve hydrique que le maïs (Alterre Bourgogne, 2012).

Une rotation diversifiée incluant un protéagineux

Dans le cadre des stratégies d'adaptation de l'agriculture à la rareté de l'eau en raison du changement climatique, l'ONERC va plus loin en proposant une stratégie d'adaptation par la demande en eau et une stratégie d'adaptation par l'offre de l'eau à usage agricole. Il soutient l'idée d'une adaptation à l'insuffisance de l'eau à usage agricole par la réduction de la consommation agricole en eau ([réduction de la demande](#)). Il faudra réduire les besoins en eau d'irrigation et réduire les volumes en eau d'irrigation en acceptant une perte de rendement moins que proportionnelle à la baisse du volume d'eau d'irrigation. Pour y parvenir, il faudra par exemple optimiser l'efficacité de l'irrigation, et mettre en place des systèmes agricoles moins exigeants en eau. En parallèle, il propose aussi la possibilité d'augmenter l'eau disponible pour les activités agricoles. Cela passe par la mise, en place de nouvelles infrastructures d'approvisionnement en eau pour contrer les épisodes de sécheresses sévères ([augmentation de l'offre](#)).

En plus de ces mesures individuelles d'adaptations, les pouvoirs publics peuvent agir en vue d'une adaptation de l'agriculture à la rareté de la ressource en eau (voir Amigues et al., 2006 pour plus détails à ce sujet).

Dans le même esprit que Reynaud (2006) ou Graveline et Mérel (2014) et conformément aux éléments précédemment exposés, nous nous concentrerons d'une part sur l'allocation du volume d'eau d'irrigation entre les cultures et d'autre part l'allocation simultanée du volume d'eau

d'irrigation et de surface agricole utile par culture qui maximisent la marge brute globale de l'exploitant agricole.

II. METHODOLOGIE

Conformément aux objectifs précédemment définis, nous proposons de construire deux modèles de programmation mathématique. Un modèle de programmation linéaire de court terme qui détermine les volumes d'eau d'irrigation par culture qui maximisent la marge brute globale. Et le second modèle de programmation mathématique de long terme qui cherchera à déterminer le couple (eau assolement) qui maximise la marge brute globale de l'exploitant agricole. Nous allons revenir en détails sur la modélisation proposée et les hypothèses effectuées. Nous expliciterons ensuite la démarche adoptée pour caler les modèles qui s'est déroulée en deux temps: un premier temps de recueil des données et un second temps de paramétrage.

1. Modèle

a. Spécification du modèle de court terme

Pour Reynaud (2006), les assolements sont fixes à court terme. Car dira-t-il, il est en général difficile à court terme de modifier les assolements notamment pour des cultures comme le maïs qui nécessite d'importants investissements en matériels d'irrigation

C'est pourquoi à court terme, la seule variable de décision de l'exploitant agricole face à la rareté de l'eau sera la quantité d'eau apportée aux cultures. En d'autres termes, à court terme, l'agriculteur ayant déjà effectué les assolements, il ne peut plus les modifier. Donc, pour faire face à la rareté de l'eau en raison du changement climatique, il va chercher à repartir de façon optimale le volume d'eau mis à sa disposition par les autorités publiques en vue d'assurer les rendements et son revenu.

Son programme de court terme consistera donc à maximiser sa marge brute globale étant donné les assolements, sous la contrainte du volume maximum prélevable.

$$\text{Max MB} = \sum_k [x_k (P_k Y_k + PAC_k - C_k - w E_k)] ; k=1.., 3 \text{ (on maximise par rapport à } E_k)$$

$$\text{S.l.c } \sum_k E_k \leq V_m$$

$$Y_k = \alpha (E_k + E_p).$$

MB représente la marge brute (en euros/ha)

PAC_k représente le montant par hectare de la prime de la politique agricole commune associée à la culture k (en €/ha);

C_k représente le coût unitaire de production (hors dépenses en eau) associé à la culture k (en €/ha) ;

w représente le prix unitaire de l'eau (en €/m³).

E_k représente la quantité totale d'eau utilisée pour irriguer la culture k au cours de la campagne agricole (en m^3).

E_p désigne la quantité d'eau de pluie (en mm).

X_k représente la part de la surface agricole utile allouée à la culture k (en ha)

V_m représente le volume maximum d'eau prélevable pour l'irrigation allouée à l'exploitant agricole pour une campagne agricole (en m^3).

P_k représente le prix unitaire associé à la culture k (en €/q) ;

Y_k représente le rendement en fin de campagne associé à la culture k (en q/ha). Ce rendement dépend de la quantité d'eau apportée à la culture au cours de la campagne (E_k), de la pluviométrie (E_p) et d'un paramètre de productivité de la ressource en eau, α .

Il s'agit à court terme de déterminer les volumes d'irrigation qui sous la contrainte du volume maximum prélevable, étant donné les assolements, maximisent la marge brute globale de l'exploitant agricole.

L'optimum est déterminé par un volume d'eau d'irrigation, une marge brute globale et un assolement préalablement défini.

b. Modélisation de la stratégie d'adaptation à long terme

À long terme, l'exploitant agricole peut modifier les assolements en vue de faire face à la rareté de l'eau en raison du changement climatique (Reynaud, 2006). L'agriculteur dispose donc d'une capacité d'adaptation supplémentaire à long terme.

Ainsi, il cherchera à déterminer pour chaque culture, la combinaison de surface et de quantité d'eau d'irrigation qui lui permet de maximiser sa marge brute globale dans un contexte de rareté des ressources en eau due à la sécheresse liée au changement climatique.

Le programme de long terme de l'agriculteur s'écrit:

$$\text{Max MB} = \sum_k [X_k (P_k Y_k + PAC_k - C_k - w E_k)] ; k=1.., 3$$

$$\text{S.I.c : } \sum_k X_k \leq \text{SAU}$$

$$\sum_k E_k \leq V_m$$

$$\sum_k t_{kj} \cdot X_k \leq T_j \quad ; j=1, \dots, m$$

$$Y_k = \alpha(E_k + E_p)$$

Où:

MB représente la marge brute (en euros/ha)

SAU représente la surface agricole utile totale (en ha) ;

PAC_k représente le montant par hectare de la prime de la politique agricole commune associée à la culture k (en €/ha);

C_k représente le coût unitaire de production (hors dépenses en eau) associé à la culture k (en €/ha) ;

w représente le prix unitaire de l'eau (en €/m³).

E_k représente la quantité totale d'eau utilisée pour irriguer la culture k au cours de la campagne agricole (en m³).

E_p désigne la quantité d'eau de pluie (en mm).

X_k représente la part de la surface agricole utile allouée à la culture k (en ha)

V_m représente le volume maximal d'eau prélevable pour l'irrigation allouée à l'exploitant agricole pour une campagne agricole (en m³).

t_{kj} représente le temps de travail nécessaire pour produire une unité de surface de culture k pendant la période j .

T_j représente la disponibilité en temps de travail au cours de la période j (en heures)

MB représente la marge brute globale(en €/ha).

P_k représente le prix unitaire associé à la culture k (en €/q) ;

Y_k représente le rendement en fin de campagne associé à la culture k (en q/ha). Ce rendement dépend de la quantité d'eau apportée à la culture au cours de la campagne (E_k), de la pluviométrie (E_p) et d'un paramètre de productivité de la ressource en eau, α .

Au final, l'optimum donné par le modèle est caractérisé par un revenu (MB), un assolement (X_k), et un volume d'eau consommé (E_k). Il s'agit donc de déterminer les assolements et les volumes d'eau d'irrigation de chaque culture qui, sous les contraintes de surface agricole utile, d'eau d'irrigation disponible et de temps de travail, procurent la marge brute la plus élevée possible. Ainsi, nous pourrions observer l'incidence des différentes évolutions de la disponibilité de la ressource en eau sur le revenu de l'agriculteur.

De façon précise, le modèle nous instruira non seulement sur l'impact d'une variation de la quantité d'eau d'irrigation sur la marge brute de l'agriculteur, mais aussi sur les ajustements opérés au niveau des assolements et du volume d'eau d'irrigation consommé par les cultures afin d'obtenir un revenu maximal. Ce sont ces ajustements qui constitueront dès lors les stratégies d'adaptation de l'agriculteur.

Nous revenons maintenant sur les principales hypothèses qui sous-tendent nos deux modèles.

c. Hypothèses des modèles

H1: La rationalité

Nous supposons que l'exploitant agricole est rationnel, c'est-à-dire qu'il choisit des combinaisons de facteurs et même de cultures qui lui procurent la plus grande satisfaction possible en termes de revenu. Dans notre cas, nous supposons que l'exploitant agricole est suffisamment

rationnel: il saura choisir la combinaison de surface et d'eau d'irrigation par culture qui lui procure la marge brute globale la plus élevée possible.

H2: Deux variables de décision: l'allocation des facteurs de production eau et terre

Dans son activité de production, l'exploitant agricole mobilise plusieurs facteurs de production comme le facteur travail, les intrants, les machines et la terre. Nous nous concentrerons sur deux facteurs de production essentiels dans cette étude: la terre et l'eau. Ces deux facteurs de productions nous semblent très importants au regard des stratégies d'adaptation au changement climatique. Les autres facteurs de production seront considérés comme fixés de manière exogène.

Nous supposons par ailleurs que la marge brute est une fonction du produit de la surface cultivée par marge dégagée par unité de surface qui est elle-même une fonction de la quantité d'eau apportée. Cela signifie que la marge brute est linéaire avec la surface.

H3: Les contraintes de prélèvement d'eau, d'assolement et de disponibilité du facteur travail

L'exploitant agricole maximise sa marge brute sous la contrainte du volume d'eau prélevable pour l'irrigation au cours d'une campagne agricole donnée. Le volume d'eau prélevable pour l'irrigation est déterminé chaque année par l'autorité administrative. Ce volume est fixé par les pouvoirs publics en vue de gérer les tensions d'usage sur les ressources en eau afin de préserver les milieux naturels et militer en faveur de la biodiversité. Dans le cadre de son activité de production, l'exploitant agricole irrigant ne peut donc utiliser un volume d'eau d'irrigation supérieur à celui qui a été mis à sa disposition par les autorités administratives durant la campagne agricole.

La surface agricole utile (SAU) désigne la superficie totale consacrée à l'activité de production agricole. Elle comprend les terres arables (destinées aux grandes cultures), les jachères et les surfaces occupées par les cultures pérennes. Elle est considérée comme fixée. Pour produire, l'exploitant agricole ne peut cultiver une surface au delà de celle dont il dispose, c'est-à-dire sa SAU. Nous excluons donc la possibilité pour l'exploitant de louer des terres additionnelles dans le cadre de son activité de production

Bien que le facteur travail soit considéré comme fixé, il n'en demeure pas moins que l'agriculteur doit tenir compte de sa disponibilité au cours des saisons de culture lorsqu'il choisit son assolement. En effet, dans la réalité, l'agriculteur ne peut travailler un volume horaire plus qu'il n'en dispose au cours de la campagne agricole.

H4: La contrainte technique de formation des rendements

Nous supposons que le rendement (Y) d'une culture k est une fonction linéaire de l'eau d'irrigation (E_i) et de l'eau de pluie (E_p) suivant la relation : $Y_k = \alpha(E_k + E_p)$. Notre spécification du lien entre rendement et ressources en eau est proche de celle donnée par Graveline et Mérel (2014) dans leur étude sur les stratégies d'adaptation des activités agricoles à la rareté de l'eau en Beauce. Reynaud (2006) retient également l'eau de pluie comme une variable explicative du rendement dans son étude sur l'impact et les adaptations de l'agriculture aux épisodes de sécheresse en Midi Pyrénées.

H5: La dépendance de la marge brute aux aides de la politique agricole

Dans notre cas, compte tenu de la forte dépendance des exploitations agricoles françaises de grandes cultures aux primes au titre de la politique agricole commune (PAC), on ajoute les aides de la PAC aux revenus issues de la vente des produits pour obtenir les recettes totales de l'agriculteur.

H6: La linéarité des charges liées à l'irrigation

Les charges liées à l'irrigation font partie des coûts de production. Elles sont supposées linéaires avec le volume d'eau d'irrigation consommée.

H7: Raisonnement à conditions économiques constantes

Nous supposons la situation économique actuelle du territoire étudié comme constante. Ce choix permet d'isoler l'impact du changement climatique de celui d'autres chocs exogènes sur l'exploitation agricole et donc de ne pas ajouter des incertitudes macroéconomiques aux incertitudes climatiques. Cependant, nous reconnaissons que ce choix peut paraître restrictif en raison de certaines évolutions économiques affectant les exploitations agricoles qui sont déjà anticipées. L'exemple des aides de la politique agricole commune (PAC) en est une illustration: il est prévu une modification de cette aide à compter de 2015.

Nous présentons à présent les données qui serviront au calage des deux modèles.

2 Données

Pour mener à bien notre étude, il nous faut calibrer le modèle économique que nous avons construit et présenté plus haut. À cet effet, nous avons eu besoin de travailler sur une exploitation agricole réelle. Nous expliquerons comment elle a été sélectionnée dans la partie relative à la méthode de collecte des données. Nous reviendrons ensuite sur les données recueillies dans ce cadre.

a. Méthode de collecte des données

Comme indiqué précédemment, l'étude s'est initialement intéressée à deux bassins versants pour ne retenir qu'un seul à l'issue d'une démarche déclinée en quatre étapes qui sont décrites dans ce qui suit.

i) Pour traiter le problème, nous avons choisi de nous concentrer sur une exploitation-type de grandes cultures car les exploitations de grandes cultures gagnent de plus en plus de terrain en Bourgogne: entre 2000 et 2010, elles sont passées de 33 à 36% de la SAU (Agreste Bourgogne, 2010).

ii) Ensuite, nous voulions que cette exploitation-type soit une exploitation qui irrigue afin de mieux appréhender les questions liées à l'eau à usage agricole.

iii) Nous avons contacté la chambre régionale d'agriculture de Bourgogne afin de choisir une exploitation-type. Nous avons appris que pour suivre l'évolution des exploitations agricoles et répondre au mieux à leurs besoins en conseil, les chambres d'agriculture bourguignonnes ont mis en place un réseau d'observatoire des systèmes agricoles pour les études et le conseil (ROSACE). Ces exploitations types sont une agrégation d'exploitations individuelles ayant sensiblement les mêmes caractéristiques en sous-groupes compte tenu de l'impossibilité de suivre individuellement chacune de ces exploitations. Les caractéristiques renseignées sont essentiellement en termes d'itinéraire technique, de pratiques culturales, de superficie totale, ainsi que de pratique ou non de l'irrigation.

Régulièrement, des données économiques de ces exploitations-types ROSACE sont produites pour servir de base aux réflexions sur les problèmes relatifs aux exploitations agricoles.

A ce stade, nous avons trouvé judicieux d'utiliser une exploitation-type ROSACE comme exploitation-type pour la conduite de notre étude. Nous n'avons toutefois pas pu obtenir les données d'exploitations type ROSACE nécessaires pour mener l'étude.

iv) Nous avons donc décidé de trouver sur nos deux terrains d'étude pressentis des exploitations agricoles de grandes cultures qui irriguent afin de les enquêter et de recueillir les données nécessaires. A ce stade, nous avons été contraints de réduire notre zone d'étude au BV du Nohain faute d'agriculteurs qui acceptent d'être enquêté dans le BV de la Tille. Les raisons de la réticence des exploitants agricoles, notamment les irrigants, tient essentiellement au manque de temps et au souci de garder secrètes les données économiques de leurs exploitations agricoles.

Au final, le travail a porté sur une exploitation agricole irriguante de grandes cultures située dans le BV du Nohain (dans la Nièvre). Des échanges avec le conseiller agricole chargée de l'irrigation de la chambre départementale d'agriculture de Nevers nous ont permis de trouver une exploitation agricole de grandes cultures qui irrigue dans le bassin versant du Nohain.

b. Présentation des données

Les données mobilisées dans le cadre de cette étude sont donc issues d'une part de l'enquête réalisée en Juin 2014 auprès de notre exploitation agricole située dans la Nièvre sur le bassin versant du Nohain et d'autre part d'entretiens réalisés auprès des experts de la chambre régionale d'agriculture de Bourgogne, de la chambre départementale d'agriculture de la Nièvre et du centre de recherche en climatologie de Bourgogne.

L'ensemble des informations recueillies sera présenté selon deux approches. L'approche quantitative présentera les informations chiffrées et l'approche qualitative s'attachera à présenter les informations à caractère qualitatif notamment les informations sur les stratégies et pratiques agricoles.

b.1. Approche quantitative

b.1.1. Les données d'enquête auprès de l'exploitation agricole retenue

Le Mercredi 04 Juin 2014, nous avons réalisé une enquête dans l'exploitation agricole retenue. L'exploitation choisie irrigue en puisant dans le Nohain, affluent de la Loire. En plus des grandes cultures, l'élevage de porcs est également pratiqué dans l'exploitation. Cependant, dans le cadre de cette étude nous nous intéresserons uniquement aux activités de production végétale qui restent prédominantes à l'échelle de l'exploitation agricole. Nous supposons donc que dans un contexte de rareté de l'eau les activités de production végétales seront plus impactées que l'élevage. L'exploitation agricole qui fait l'objet de l'étude s'étend sur un sol à bon potentiel agronomique: sol argileux qui contient moins de cailloux.

Cette enquête a permis de collecter des données sur les assolements, les marges brutes, les volumes prélevable, les prix de ventes des cultures, les volumes d'eau utilisés pour irriguer les cultures et les rendements. Des données sur les primes au titre de la politique agricole commune et des données sur les charges opérationnelles ont également été recueillies.

Ces informations sont consignées dans les comptes globaux de l'exploitation: bilans, comptes de production, soldes intermédiaires de gestion. Nous avons en outre pris connaissance du tableau d'amortissement relatif au matériel agricole.

Cependant, nous n'avons pas pu obtenir les valeurs de toutes les variables pour couvrir la période 2007-2013 car l'exploitant enquêté ne disposait que de données à partir de l'année 2008, date à laquelle il s'est chargé de la gestion de l'exploitation après le départ à la retraite de son père.

Le dépouillement de ces données a été fait selon une grille de lecture qui suit et retrace la logique entre les comptes de la comptabilité privée. Les données ainsi recueillies couvrent les campagnes agricoles de 2008 à 2013 (voir Annexe 1 pour plus de détails).

L'exploitant agricole nous a également fourni ses autorisations de prélèvement en eau d'irrigation pour les campagnes agricoles de 2009 à 2013. Les autorisations de prélèvement d'eau d'irrigation délivrées aux exploitants agricole en début de campagne d'irrigation par le service Eau Forêt Biodiversité de la Direction départementale des territoires indiquent le volume d'eau maximum prélevable pour irriguer les cultures. Cependant, nous n'avons pas pu obtenir les chiffres sur le volume prélevable des années 2007,2008 et 2010. De manière générale, sur notre terrain d'étude, jusqu'à ce jour, la disponibilité de l'eau pour l'irrigation ne constitue pas un souci majeur. Les agriculteurs arrivent à satisfaire leurs besoins en eau d'irrigation sans toutefois épuiser le volume qui a été mis à leur disposition par l'autorité administrative au cours de la campagne agricole. Le tableau 2 suivant nous montre la part du volume maximum prélevable consommée par l'exploitation agricole pour irriguer les cultures.

Années	Volume maximum prélevable (m ³)	Volume d'eau d'irrigation consommé (m ³)	Part du volume prélevable consommée (%)
2007		32690	
2008		26680	
2009	131722	49970	37.93
2010		45600	
2011	154080		
2012	140160	61270	43.70
2013	122400	55000	44.93
2014	131629		

Tableau 2: Volume prélevable et consommation en eau d'irrigation de l'exploitation agricole enquêtée.

Source: Données d'enquête de l'exploitation agricole, juin 2014 et calcul de l'auteur.

Le tableau 2 indique que l'exploitant agricole a utilisé moins de la moitié du volume d'eau mise à sa disposition pour irriguer ces cultures au cours des années 2009, 2012 et 2013. Ce tableau donne également une idée de l'évolution du volume maximum prélevable et de la consommation en eau d'irrigation de notre exploitation agricole. Certes, il est difficile de dégager une tendance générale sur l'évolution de chacune de ces deux grandeurs. Mais ce qu'on peut remarquer, c'est que lorsque le volume maximum prélevable diminue (ou augmente), la consommation en eau d'irrigation baisse (augmente). Donc la consommation d'eau d'irrigation varie dans le même sens que le volume maximum prélevable.

b.1.2. Les données provenant de la Chambre départementale d'agriculture de la Nièvre.

Nous avons rencontré le conseiller irrigation et la conseillère chargée des études économiques de la chambre départementale d'agriculture de la Nièvre pour valider ces données.

La journée de travail tenue à Nevers avec la conseillère agricole en charge des études économiques nous a permis de corriger certaines données aberrantes et d'obtenir d'autres données complémentaires relatives à l'exploitation que nous avons enquêtée. C'est ainsi que nous avons obtenu des données partielles sur l'année 2007: elle nous a fourni des données sur la surface cultivée, les prix agricoles, les rendements, les charges opérationnelles et les marges brutes par cultures de l'exploitation que nous avons enquêtée (voir annexe 2 pour les détails). En outre, la conseillère nous a fourni les données de la PAC. Elle nous a également remis un document qui simule les variations des aides au titre de la politique agricole commune à compter de l'année 2015. Ce simulateur donne une idée du montant des aides de la PAC pour chaque culture à compter de 2015 quand la réforme prévue entrera en vigueur.

L'enquête a permis d'identifier les cultures pratiquées à l'échelle de l'exploitation: blé tendre, colza d'hiver, orge hiver, orge de printemps, maïs grain, pois, tournesol, avoine de printemps. Parmi ces cultures, celles qui ont été irriguées au cours d'une campagne agricole au moins sur la période 2007 à 2013 sont: le blé, le maïs, le colza, orge de printemps, le pois.

Il est à noter que les données collectées auprès de la conseillère agricole concernant l'exploitation étudiée sont sensiblement les mêmes que celles de l'enquête

Les échanges avec le conseiller irrigation de la chambre départementale de l'agriculture de la Nièvre, par téléphone, par courriers électroniques et la séance de travail que nous avons eue avec lui à Nevers nous ont permis d'obtenir des données sur les volumes d'irrigation de notre exploitation d'étude. Le compte rendu de notre premier entretien par skype est mis en Annexe 3. Les données sur l'irrigation sont consignées dans le Tableau 3 ci-dessous.

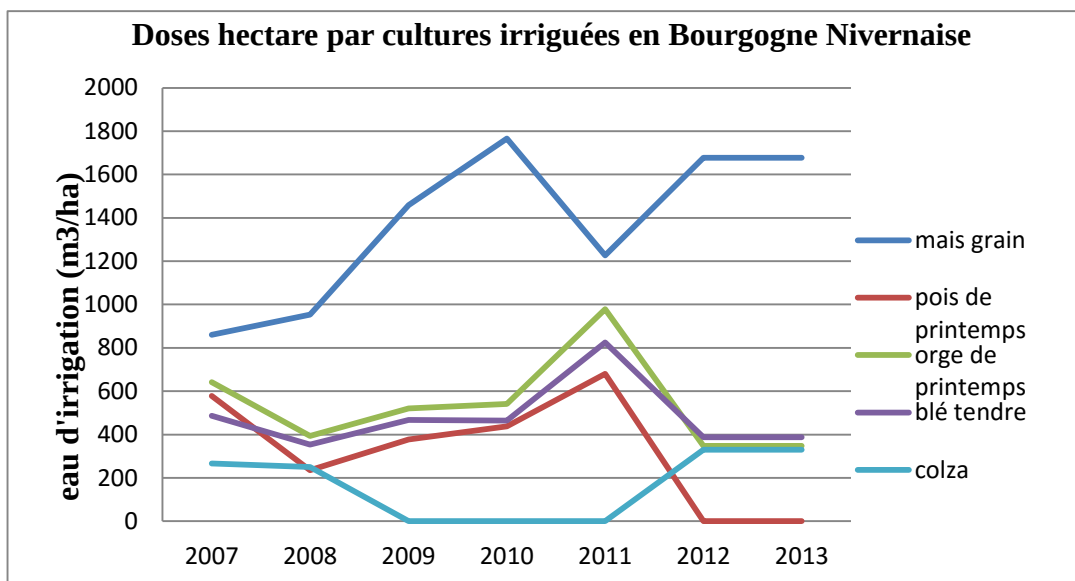
SUPERFICIE (ha)	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
maïs grain	24	29	33	26,5	41	39,7	18,9
pois de printemps	8			12,8	8,8		
orge de printemps				6,1	14		
blé tendre	26			30	32		
colza						19	
VOLUME (m³/ha)	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
maïs grain	300	300	1182	1000	640	1191	1195
pois de printemps	412.5			200	1818.18		
orge de printemps				202	402.14		
blé tendre	200			200	640		
colza						400	

Tableau 3: Données irrigation de l'exploitation agricole enquêtée

Source: Chambre d'agriculture de la Nièvre et calcul de l'auteur.

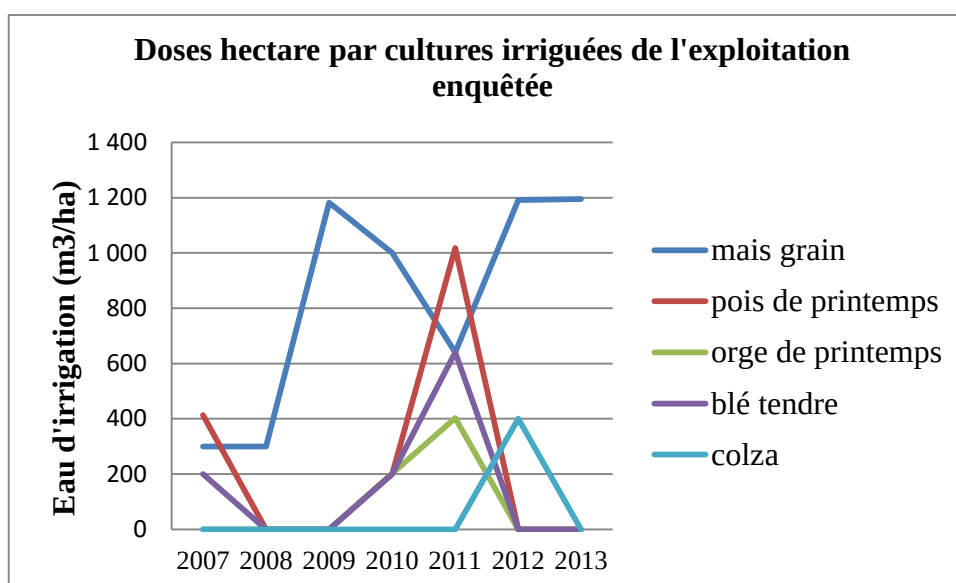
Le conseiller agricole a par ailleurs mis à notre disposition les données de volume d'irrigation par hectare sur la Bourgogne Nivernaise. Ces informations sont mises en annexe 4 Ce sont des données moyennes issues de l'ensemble des exploitations grandes cultures irriguées du département de la Nièvre.

La comparaison de ces données avec celles de l'exploitation étudiée donnent des résultats intéressants. Par exemple en 2013, sur notre exploitation d'étude, la dose par hectare du volume d'eau irriguée pour le maïs représente 71% de la dose par hectare de l'exploitation type Bourgogne Nivernaise (voir graphiques 4 et 5).



Graphique 4: Doses hectare par cultures irriguées en Bourgogne Nivernaise

Source des données pour la réalisation du graphique: Chambre d'agriculture de la Nièvre.



Graphique 5: Doses à l'hectare par culture irriguée de l'exploitation enquêtée

Source des données pour la réalisation du graphique: Chambre d'agriculture de la Nièvre.

De 2009 à 2011, le colza n'a pas été irrigué ni dans notre exploitation agricole ni en Bourgogne nivernaise. L'année 2011 est intéressante à observer: la dose à l'hectare a connu une hausse importante atteignant ainsi son niveau maximal pour toutes les cultures sauf pour le maïs et le colza, aussi bien dans l'exploitation agricole soumise à notre étude que dans l'ensemble de la Bourgogne nivernaise.

De 2012 à 2013, la dose par hectare de l'eau d'irrigation ne varie pas pour toutes les cultures à l'exception du colza dans notre exploitation d'étude.

On peut admettre à l'issue de cette analyse comparative des doses à l'hectare que, le comportement d'irrigation de l'exploitation agricole que nous avons retenue pour l'étude est assez représentatif du comportement d'irrigation de l'ensemble des exploitations agricoles irriguantes de la Bourgogne nivernaise.

Cependant, contrairement aux données économiques, les données sur le volume d'irrigation fournies par le conseiller irrigation diffèrent à certaines périodes de celles que nous avons récoltées sur le terrain. (Voir tableau 3 et annexe 1 pour plus de détails).

b1.3. Les données de pluviométrie du centre de recherche en climatologie de Bourgogne(CRC).

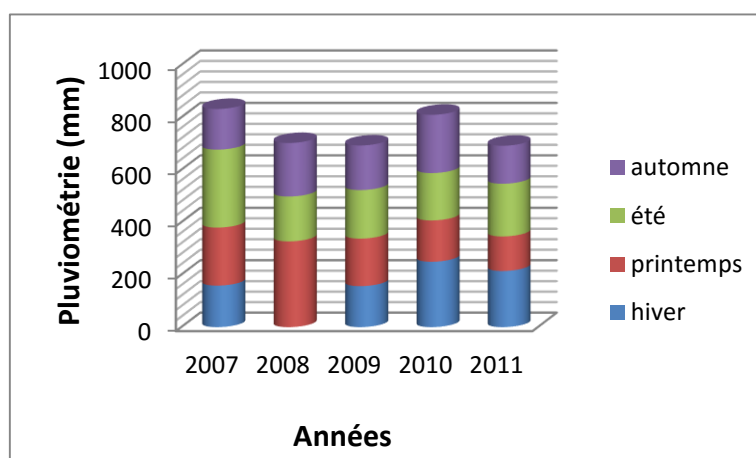
Les données sur la pluviométrie proviennent du Centre de recherche en climatologie (CRC). Ce sont des données de la station Météo France la plus proche de la position géographique de notre exploitation d'étude. En effet, nous avons fourni aux chercheurs du CRC les coordonnées géographiques de la commune la plus proche de notre exploitation d'étude, les climatologues ont ainsi extrait les données pluviométriques à pas de temps saisonnier pour les mettre à notre disposition. Les données couvrent la période 2007-2011. Les données des années 2012 et 2013 n'ont pu être obtenues.

Les données brutes telles que fournies par le CRC sont dans le tableau ci-dessous.

Pluviométrie (mm)	2007	2008	2009	2010	2011
DJF	158,4		156,4	249,5	214,2
MAM	221,4	327,1	181,3	157,6	131,8
JJA	297,3	171,2	185,2	180,6	201
SON	155,2	204,2	170,1	222,3	144,9

Tableau 4: Données de précipitations saisonnières observées

Source: CRC-Bourgogne.



Graphique 4: Précipitations saisonnières observées

Source: CRC-Bourgogne. DJF= Décembre-Janvier-Février = hiver; MAM= Mars-Avril-Mai = printemps; JJA=Juin-Juillet-Août = été; SON= Septembre-Octobre-Novembre = automne.

L'année 2008 ressort comme très pluvieuse au printemps mais très faible en été sur les cinq ans considérés. Les trois dernières années montrent un faible niveau cumulé de précipitations printanières et estivales. Or ces deux périodes sont des périodes de forts besoins en eau des cultures.

b.1.4. Les données en temps de travail de la chambre régionale d'agriculture de Bourgogne

Faute de données relatives au temps de travail de l'exploitation agricole enquêtée, nous avons recouru aux données en temps de travail sur une exploitation agricole ayant sensiblement les mêmes caractéristiques que notre exploitation agricole. En effet, la chambre d'agriculture de la Bourgogne a mis au point un détail des temps de travail des différents chantiers par culture pour une exploitation type de grandes cultures à bon potentiel agronomique avec une SAU utile comprise entre 100 et 200 ha et une unité de main d'œuvre égale à 1.5, mais pouvant recouvrir à une main d'œuvre supplémentaire pour la moisson.

L'exploitation agricole retenue pour notre étude a une SAU de 133 ha. Le sol a un bon potentiel agronomique selon les dires de l'exploitant agricoles lui-même (voir compte rendu de l'enquête en annexe 5). L'exploitant agricole travaille avec sa femme dans l'exploitation, ce qui correspond à une unité de main d'œuvre égale à 1.5 car l'exploitant agricole représente 1 unité de main d'œuvre et sa femme représente 0.5 unité de main d'œuvre. Lors de nos échanges au cours de l'enquête, l'exploitant a souligné qu'il pouvait faire appel à une main d'œuvre supplémentaire notamment en période de moisson.

Notre exploitation agricole a sensiblement les mêmes caractéristiques que celle dont la chambre d'agriculture a élaboré les temps de travail. Ainsi, nous pouvons nous aligner suivant les propos des conseillers agricoles qui affirment qu'en général les temps de travail sur une exploitation agricole diffèrent peu de ceux sur l'ensemble des exploitations agricoles de la zone considérée. En conséquence, les données en temps de travail de la chambre d'agriculture de Bourgogne sont retenues pour paramétrer la contrainte du facteur travail. Les données sont fournies par chantier pour chaque culture. On distingue cinq chantiers: préparation du sol, semis, engrais, traitement phytosanitaire, récolte.

Les données relatives à la culture du maïs ne sont pas fournies. Nous retiendrons comme temps de travail pour le maïs le temps moyen de travail sur les autres grandes cultures, et ce pour chacun des cinq chantiers.

Le tableau retraçant le détail des temps de travail des différents chantiers par cultures est le suivant:

	Blé	Escourgeon	Colza	Pois	Tournesol	Colza énergétique	Maïs
Préparation du sol (h/ha)	2.25	1.96	3.16	2.46	3.22	3.16	2.70
Semis (h/ha)	0.77	0.77	0.69	0.91	0.69	0.69	0.75
Engrais (h/ha)	1	0.79	0.79	0.21	0.37	0.79	0.66
Traitement phytosanitaire (h/ha)	0.88	0.48	0.98	0.80	0.48	0.98	0.77
Récolte (h/ha)	2.22	2.22	3.42	3.42	1.72	1.72	2.45
Total (h/ha)	7.12	6.22	7.34	7.8	6.48	7.34	7.05

Tableau 5: Temps de travail des cultures par chantier

Source: Chambre Régionale d'agriculture de Bourgogne et calcul de l'auteur.

b.2. Approche qualitative

Lors de l'enquête de l'exploitant agricole, nous avons également cherché à savoir que ferait l'agriculteur en cas de sécheresse accrue. Nous l'avons interrogé sur ce qu'il sait du changement climatique.

L'exploitant agricole nous a signalé que le changement climatique est une réalité et qu'il commence à se faire sentir à travers des sécheresses estivales. Répondant à la question: comment les agriculteurs vont-ils faire face à l'insuffisance d'eau qu'entraîneraient ces épisodes de sécheresses dues au changement climatique? Notre enquête a dit qu'il faudra revoir les assolements en pratiquant des cultures moins gourmandes en eau (voir compte rendu de l'enquête en annexe 5).

Du côté des conseillers agricoles, les échanges ont également produit des informations qualitatives. Les discussions avec eux nous ont permis de prendre du recul et de revisiter certains aspects du modèle notamment la variabilité du rendement. Au départ, nous raisonnions en considérant le rendement comme une donnée, c'est-à-dire une constante qui serait une valeur moyenne de la série de rendements passés. Les conseillers agricoles nous ont signifié que cette hypothèse réduirait la portée de notre étude compte tenu de l'instabilité chronique du rendement agricole. Nous avons donc pris en compte et intégré dans le modèle la variabilité des rendements en les faisant dépendre de la disponibilité de la ressource en eau.

3. Calibrage des modèles

Le calibrage ou calage d'un modèle consiste à ajuster certains paramètres de ce modèle afin que les résultats des simulations réalisées avec le modèle soient conformes aux observations réelles. En d'autres termes, caler un modèle c'est déterminer les paramètres du modèle de sorte qu'il soit capable de reproduire correctement une situation de référence.

Le modèle a été calé avec les données de la campagne 2007/2008. Ce choix résulte de deux contraintes majeures: Tout d'abord, il s'agit de la seule année pour laquelle nous avons le plus grand nombre d'informations sur les données économiques de l'exploitation. L'année 2008 étant

sensiblement une année ‘moyenne’ du point de vue climatique (Graveline et Mérel, 2014.), il est préférable de calibrer le modèle à partir des données de cette année moyenne (Reynaud, 2006). Pour la période 2007/2008, nous avons la marge brute par culture, le volume d’eau consommée par culture, le volume de prélèvement autorisé, les assolements, les aides de la PAC, les rendements, les prix agricoles et les charges opérationnelles par culture.

Le principe du calage consiste à résoudre le programme de maximisation de l’exploitant agricole en entrant dans le modèle les valeurs de toutes les variables en dehors des variables de décisions (assolements et eau d’irrigation) et à vérifier si le modèle reproduit correctement les assolements, la quantité d’eau d’irrigation et la marge brute observés en 2008 à l’échelle de l’exploitation.

Le calibrage du modèle se fait avec trois cultures: le blé, le maïs et le pois. Ce choix résulte du fait qu’en 2008, nous ne disposons de toutes les informations nécessaires au calibrage du modèle que pour ces trois cultures. Vu du côté de l’irrigation, les cultures de maïs et de blé sont les plus grandes consommatrices en eau d’irrigation. Ainsi, calibrer le modèle en prenant en compte ces deux cultures permet de maintenir la question des ressources en eau au cœur de notre préoccupation centrale.

a. Valeurs des paramètres de base

La surface agricole utile de l’exploitation est de 133ha.

Ne disposant pas du volume de prélèvement maximal pour l’année 2008, nous retiendrons comme volume de prélèvement autorisé en 2008, la valeur de la consommation en eau d’irrigation de l’exploitation agricole en 2008 car pour que les exploitants agricoles s’adaptent, il faut les mettre en situation réelle.

Pour l’eau de pluie, nous faisons la somme des précipitations observées au cours de l’année 2008.

Le prix du mètre cube d’eau d’irrigation nous a été donné par le conseiller irrigation de la chambre d’agriculture de la Nièvre. Il est estimé à 0.27 €/m³.

La valeur des autres paramètres pour le calage du modèle sont données dans le tableau 6 à la fin de cette partie.

b. Paramétrage de la fonction de contrainte du facteur travail pour le modèle de long terme

La préparation du sol et le semis constituent les véritables chantiers contraignants pour l’agriculteur. En effet il doit réaliser la préparation du sol dans un lap de temps donné pour ne pas perturber le calendrier des rotations culturales. Nous écrivons donc les contraintes en temps de travail en considérant que ces deux chantiers.

Pour le blé, le temps de préparation du sol et du semis ne doit pas excéder 2 mois. À raison de 15 jours de travail par mois, cela fait 30 jours de travail par mois.

Si on considère en moyenne 6 h de travail par jours, nous aurons au total 180 h pour réaliser la préparation du sol et le semis du blé.

Pour le maïs, à dire d'expert, le temps de préparation du sol et du semis ne doit pas excéder 100 h. Ce temps est réduit de moitié pour le pois concernant les mêmes chantiers.

Nous allons écrire la contrainte en temps de travail pour chacune des cultures. Nous savons le temps qu'il faut pour la préparation du sol et le semis de chacune des cultures (voir tableau 5 pour les détails). Nous venons de voir les temps de travail disponible pour chaque culture pour la réalisation de la préparation du sol et du semis. La contrainte du facteur travail consistera à écrire que le produit de la surface cultivée par le temps de préparation du sol et du semis d'un hectare de cette culture ne doit pas excéder le temps total disponible pour la réalisation desdits chantier de la culture considérée.

Par exemple pour le blé, il faut 3.02 h/ha pour préparer le sol et faire le semis. la contrainte du facteur travail concernant la culture du blé se formule comme suit: 3.02 h/ha multiplié par la surface du blé doit être inférieure ou égale à 180 h. (180 h est le temps total pour faire la préparation et le semis du blé).

On procède de la même manière pour déterminer les contraintes en facteur travail pour les autres cultures concernant les chantiers les plus contraignant que sont la préparation du sol et le semis.

c. Estimation du paramètre de productivité du facteur eau

Le rendement des cultures est linéairement fonction de l'eau et de l'eau d'irrigation selon la formule $Y_k = \alpha (E_k + E_p)$. Il faut donc estimer le paramètre alpha (α) à partir des données d'irrigation et de pluviométrie de l'année 2008. Après avoir estimé alpha à travers la relation $\alpha = Y_k / (E_k + E_p)$, on insère dans le modèle le rendement avec la valeur estimée des paramètres α et E_p .

Le tableau 6 récapitule les valeurs des paramètres servant au calage du modèle.

Cultures	Blé	Maïs	pois
Paramètres			
Prix agricoles (€/q)	13	14	15
Aides de la PAC (€/ha)	78	78	130
Charges opérationnelles (€/ha)	365.5	342.8	384.9
Eau de pluie (mm)	702.5	702.5	702.5
Temps de travail (h) disponible pour la préparation du sol et semis	180	100	50
α	0.0975	0.011	0.064

$W=0.27 \text{ €/m}^3$; $V_m=8700 \text{ m}^3$;

SAU=133 ha

Tableau 6: Valeurs des paramètres pour le calage du modèle

Source: Calcul de l'auteur à partir des données de la chambre d'agriculture de la Nièvre et des données d'enquêtes de juin 2014 auprès de l'exploitation étudiée.

III. SIMULATIONS ET PRESENTATION DES RESULTATS

1. Simulations

Il s'agit d'évaluer les effets de variation de variables climatiques et/ou macroéconomiques sur l'économie de l'exploitation afin d'éclairer les décideurs publics et les agriculteurs sur les leviers d'action pour faire face au changement climatique avec son corollaire de pression sur les ressources en eau

Nos premières hypothèses de variation s'intéressent à une variable climatique, plus précisément à l'eau de pluie et à une variable qui est sous le contrôle des pouvoirs publics: le volume maximum prélevable.

Brisson et Levraut (2010) précisent que le changement climatique pourrait provoquer de façon générale une baisse du confort hydrique au cours de la production des cultures pluviales et irriguées. Cela nous amène à envisager un scénario pessimiste quand à l'évolution future de la variable eau de pluie.

La question maintenant est de savoir dans quelle proportion cette variation (diminution) de l'eau de pluie s'effectuera?

Pour répondre à cette question, nous avons sollicité l'expertise et l'expérience du conseiller irrigation de la chambre d'agriculture de la Nièvre.

Dans la Nièvre, il semblerait qu'une baisse du volume total des ressources en eau inférieure à 20% n'entraîne pas de réduction de volume prélevable pour l'irrigation. C'est pourquoi nous commençons par simuler une baisse de 20% de l'eau de pluie.

Le second scénario s'attache à voir ce qui se passe lorsque le niveau du volume prélevable diminue de 20% en maintenant constant le niveau des précipitations.

La troisième simulation s'intéresse à la baisse simultanée de l'eau de pluie et du volume maximum prélevable respectivement de 20%. En effet, la baisse du volume maximum prélevable peut résulter, toutes choses égales par ailleurs à une baisse du niveau de l'eau de pluie. Nous considérons donc qu'une baisse de 20% du niveau de l'eau de pluie entraînerait une diminution du volume prélevable dans les mêmes proportions. Il s'agit donc d'examiner les conséquences de ce couple de chocs, baisse de l'eau de pluie-eau d'irrigation sur l'économie de l'exploitation agricole.

Il est prévu une baisse des subventions au titre de la politique agricole commune à compter de 2015. Il serait intéressant de voir quel serait l'impact de cette réduction des aides de la PAC sur l'économie de l'exploitation agricole.

Le nouveau cadre financier européen 2014/2020 pour la PAC prévoit une diminution du budget total disponible pour les droits à paiements unique de l'ordre de 3 à 4%. Notre dernier scénario sera donc une réduction de 3% des aides de la PAC avec une baisse combinée de l'eau de pluie et du volume prélevable de 20%.

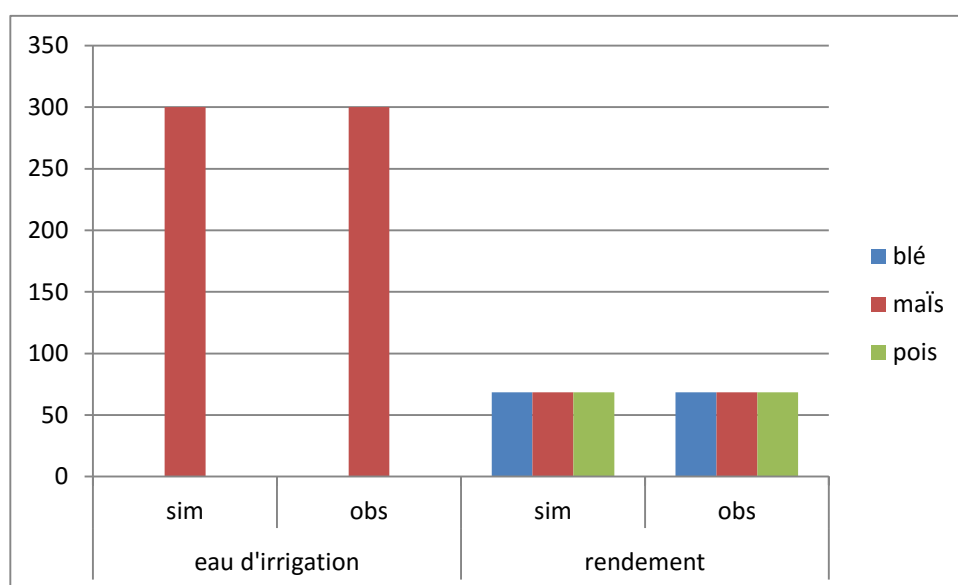
2. Résultats des simulations

a. Résultats des simulations avec le modèle de court terme

Les résultats des simulations pour le calage du modèle de court terme sont présentés dans le tableau ci dessous:

		Blé	Maïs	Pois
Rendement (q/ha)	simulé	68,5	103,5	45
	observé	68,5	103,5	45
Eau irrigation (m3/ha)	simulé	0	300	0
	observé	0	300	0

Tableau 7: Résultats des simulations pour le calage du modèle de court terme



Graphique 6: Histogramme des résultats des simulations du calage du modèle de court terme

Le graphique 6 montre que le modèle reproduit correctement les rendements et les consommations en eau d'irrigation réalisés en 2008 pour toutes les trois cultures.

La marge brute globale observée pour ces trois cultures s'élève à 68442 €. Pour obtenir cette marge brute globale, on multiplie la marge brute par hectare de chaque culture par la surface cultivée puis on additionne les marges brutes ainsi obtenues pour chaque culture. Ce qui nous donne un total de 68442 € pour les trois cultures (voir tableau des données économiques de l'exploitation annexe 2 pour plus de détails). La marge brute globale donnée par le modèle est de 68414 €. Cet écart de 0.04% entre marge brute simulée et observée est tolérable quand on sait que notre solveur Excel résout avec une marge d'erreur de 5%. Étant donné que les rendements et les volumes d'eau apportés aux cultures sont bien reproduits et la marge brute globale assez bien reproduite, nous allons considérer que le modèle est globalement bien calé.

Ainsi, nous pouvons à présent l'utiliser pour effectuer différentes simulations sur l'eau de pluie, le volume prélevable et les primes de la PAC.

✓ SCÉNARIO 1: BAISSÉ DE L'EAU DE PLUIE DE 20%

Les résultats de la simulation portant sur une réduction de l'eau de pluie de 20% sont consignés dans le tableau ci-dessous.

	Cultures	Avant simulation	Après simulation	Variation (%)
Rendement (q/ha)	Blé	68.5	68.5	0
	Maïs	103.5	100	-3.4
	Pois	45	45	0
Eau d'irrigation (m³/ha)	Blé	0	3	+3
	Maïs	300	294	-2
	Pois	0	3	+3
Marge Brute Globale (€)		68414	67050	-2

Tableau 8: Résultats de la simulation d'une baisse de l'eau de pluie de 20%

Lorsque l'eau de pluie diminue, pour assurer les rendements du maïs et du pois, les volumes d'eau d'irrigation du blé et du pois passe de 0 à 3 m³/ha.

La quantité d'eau apportée au maïs baisse, elle passe de 300 m³/ha à 294 m³/ha soit une baisse de 2%. Cette baisse de l'eau d'irrigation du maïs entraîne la chute de son rendement de l'ordre de 3.4%. Il passe de 103.5 q/ha à 100 q/ha.

La marge brute globale passe de 68414 € à 67050 € soit une chute de 2%.

✓ SCÉNARIO 2: BAISSÉ DE 20% DU VOLUME MAXIMUM PRELEVABLE

Les résultats de la baisse de 20% du volume prélevable sont donnés dans le tableau ci après.

	Cultures	Avant simulation	Après simulation	Variation (%)
Rendement (q/ha)	Blé	68.5	68.5	0
	Maïs	103.5	84	-18.84
	Pois	45	45	0
Eau d'irrigation (m³/ha)	Blé	0	0	0
	Maïs	300	240	-20
	Pois	0	0	0
Marge Brute Globale (€)		68414	61113	-10.67

Tableau 9: Résultats de la simulation d'une baisse du volume prélevable de 20%

Une baisse de 20% du volume maximum prélevable entraîne une diminution du volume d'irrigation du maïs de 20%. Le rendement du maïs subit alors une perte de 18.84% en passant de 103.5 q/ha à 84 q/ha

Les rendements du blé et du maïs ainsi que leurs volumes d'irrigation ne varient pas.

La marge brute globale passe de 68414 € à 61113 €. Cela correspond à une perte de marge brute de l'ordre de 10.67%.

✓ SCÉNARIO 3: BAISSÉ DE L'EAU DE PLUIE ET DU VOLUME PRELEVABLE DE 20%.

Les résultats d'une baisse conjointe de l'eau de pluie et du volume prélevable sont fournis par le tableau suivant:

	Cultures	Avant simulation	Après simulation	Variation (%)
Rendement (q/ha)	Blé	68.5	68.5	0
	Maïs	103.5	81	-21.7
	Pois	45	45	0
Eau d'irrigation (m ³ /ha)	Blé	0	3	3
	Maïs	300	234	-22
	Pois	0	3	3
Marge Brute Globale (€)		68414	59742	-12.67

Tableau 10: Résultats de la simulation d'une baisse de l'eau de pluie et du volume prélevable de 20%

Lorsque la diminution de l'eau de pluie de 20% est suivie de la baisse du niveau du volume maximum prélevable dans les proportions, le rendement du maïs baisse de 21.7%. Le volume d'eau apportée à cette même culture chute de 300 m³/ha à 234 m³/ha, soit une baisse de 22%.

Les rendements du pois et du blé restent inchangés, mais désormais ces deux cultures sont irriguées avec un volume de 3 m³/ha chacune.

La marge brute globale chute à 59742 € correspondant à une baisse de 12.67 %.

✓ **SCÉNARIO 4: BAISSÉ DES AIDES DE LA PAC DE 3% COMBINÉE AVEC UNE BAISSÉ DE L'EAU DE PLUIE ET DU VOLUME PRELEVABLE DE 20%.**

Pour des assolements fixes, une baisse de 3% du montant des primes de la PAC (il semble qu'il soit envisagé à partir de 2015) combinée à une baisse de l'eau de pluie de 20% et du volume prélevable de 20% entraînera une diminution de la marge brute globale. La marge brute passera de 68414 € à 59556 €, soit une baisse de 12.94%.

- **Tableau récapitulatif des résultats des simulations sur le volume prélevable et/ou l'eau de pluie.**

	Initial	-20% Ep	-20% Vp	-20% (Ep et Vp)	-3% PAC et -20% (Ep, Vp)
Marge brute (€)	68442	67050	61113	59742	59556
(variation en %)		(-2)	(-10.67)	(-12.67)	(-12.94)
Actions		Baisse du rendement et du volume d'irrigation du maïs. Report eau d'irrigation du maïs sur le blé et le pois	Baisse du rendement et eau d'irrigation du maïs	Baisse du rendement et eau d'irrigation du maïs. report eau d'irrigation du maïs sur le blé et le pois	Baisse eu d'irrigation du maïs, apport d'eau d'irrigation au blé et au pois

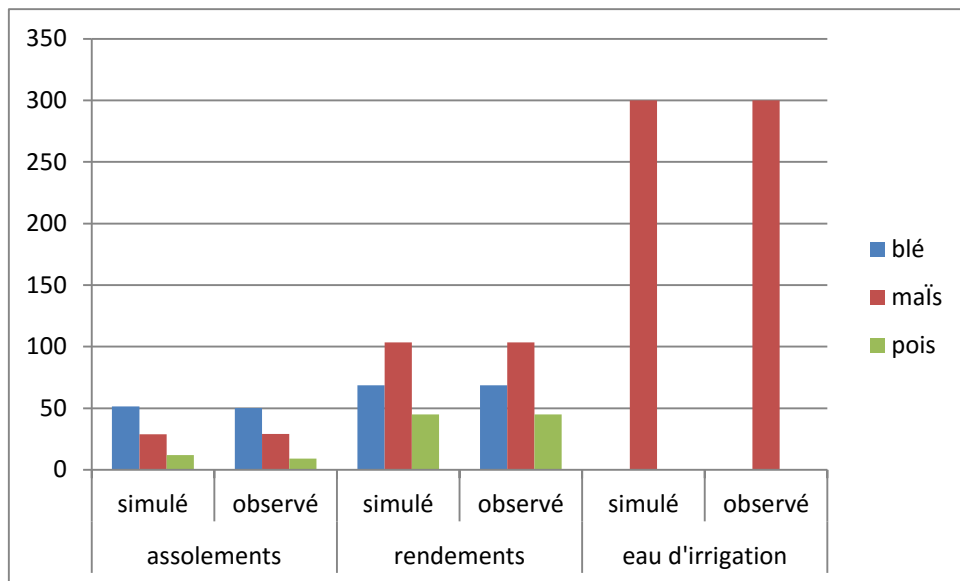
Tableau 11 Récapitulatif des résultats des simulations

b. Résultats des simulations avec le modèle de long terme

Les résultats des simulations pour le calage du modèle de long terme sont donnés dans le tableau et le graphique ci dessous.

		Blé	Maïs	Pois
Assolement (ha)	simulé	51.4	28.9	12.9
	observé	50.1	29	9.2
Rendement (q/ha)	simulé	68.5	103.5	45
	observé	68.5	103.5	45
Eau irrigation (m3/ha)	simulé	0	300	0
	observé	0	300	0

Tableau 12: Résultats des simulations pour le calage du modèle de long terme



Graphique 7: Résultats des simulations du calage du modèle de long terme

Le graphique 7 ci-dessus montre que le modèle de long terme reproduit assez correctement les assolements, les rendements et les apports en eau d'irrigation. La marge brute globale donnée par le modèle de long terme est de 68444€ tandis que celle qui est observée s'élève à 68442€. Ainsi, nous pouvons conclure que le modèle de long terme est globalement bien calibré.

Nous l'avons donc utilisé pour réaliser des simulations sur la baisse du volume prélevable et/ou du niveau de l'eau de pluie.

✓ **SCÉNARIO 1: BAISSÉ DE L'EAU DE PLUIE DE 20%**

La diminution de l'eau de pluie provoque la baisse des rendements agricoles alors que les assolements et l'eau d'irrigation ne varient pas.

✓ **SCÉNARIO 2: BAISSÉ DE 20% DU VOLUME MAXIMUM PRELEVABLE**

Lorsque le volume prélevable baisse, l'eau d'irrigation et le rendement du maïs baisse sa surface ne varie pas. Les surfaces ainsi que les rendements du pois et du blé ne changent pas. Le pois et le blé demeurent non irrigués.

✓ **SCÉNARIO 3: BAISSÉ DE L'EAU DE PLUIE ET DU VOLUME PRELEVABLE DE 20%**

La baisse conjointe de l'eau de pluie et du volume prélevable provoque la baisse des rendements de toutes les cultures. Les assolements ne varient pas. Le volume d'eau apporté au maïs diminue. Le pois et le blé demeurent non irrigués.

La marge brute globale baisse pour chacune des simulations effectuées.

3. Analyses et commentaires des résultats

a. Commentaires des résultats du modèle de court terme

Face à la baisse de l'eau de pluie, pour assurer les rendements des cultures pratiquées en sec, l'agriculteur a recours à l'irrigation. Dans notre cas, le blé et le maïs sont désormais irrigués.

L'exploitant agricole procède à un rationnement du volume d'eau apporté au maïs entre toutes les cultures qu'il pratique. Ainsi la faiblesse de l'eau de pluie est compensée par la diminution du volume d'irrigation du maïs au profit des cultures pluviales.

Nos résultats montrent qu'il faudra recourir à l'irrigation pour assurer les rendements des cultures pluviales. Ces résultats apportent un soutien à la thèse du recours à l'irrigation comme stratégie d'adaptation au changement climatique. En effet Levraut (2014) soutenait que l'irrigation fait partie des solutions d'adaptation au changement climatique, mais pas la seule.

Pour obtenir le niveau le plus élevé possible de la marge brute globale face à la baisse du volume prélevable, le volume d'eau apporté au maïs a baissé de 25% tandis que son rendement a chuté de 23.21%. La maximisation de la marge brute s'est donc soldée en gros, par une baisse de rendement de culture moins que proportionnelle à la baisse du volume d'eau apportée à la culture.

Cela correspond à la stratégie d'adaptation préconisée par l'ONERC (2009) qui invitait les irrigants dans le cadre de l'adaptation au changement climatique à accepter une perte de rendement moins que proportionnelle à la diminution de la quantité d'eau apportée aux cultures. En effet l'ONERC (2009) proposait parmi les stratégies d'adaptation de l'agriculture à l'insuffisance de l'eau en raison du changement climatique, une réduction de la consommation agricole en eau à travers une réduction des besoins en eau des cultures et une réduction du volume d'eau d'irrigation.

La baisse du niveau de volume maximum prélevable aggrave la perte de marge brute de l'exploitant agricole qu'une simple baisse de l'eau de pluie. Ce résultat peut se comprendre aisément dans la mesure où la révision à la baisse du volume prélevable intervient parfois dans un contexte marqué par la faiblesse des pluies. De ce point de vue, la baisse du volume prélevable se présente comme la conséquence de la rareté des pluies. Cette baisse du volume prélevable apparaît dès lors comme un choc additionnel qui vient accentuer la rareté d'eau pour les exploitants agricoles. Ainsi, son impact est nécessairement plus élevé que celui causé par une baisse de la pluviométrie sur la marge brute de l'exploitant agricole.

Il serait donc souhaitable que d'une part, les autorités publiques évaluent correctement l'opportunité de leur intervention dans ce domaine pour éviter des interventions qui n'ont pas lieu d'être et d'autre part, qu'elles envisagent des mesures compensatoires à l'endroit des agriculteurs dans le cadre de leurs différentes interventions sur la révision du niveau du volume prélevable. (Reynaud, 2006).

À cet effet, l'on pourrait explorer les pistes de mise sur pied d'un système d'assurance publique en vue d'assurer les risques liés au changement climatique dans le domaine agricole.

La baisse simultanée de l'eau de pluie et du volume prélevable dans une même proportion k est plus préjudiciable à la marge brute de l'exploitant agricole qu'une unique baisse du niveau de l'eau de pluie ou du volume prélevable dans les mêmes proportions k . Ce résultat s'explique par le fait que la baisse de l'eau de pluie et du volume maximum prélevable agissent en synergie pour réduire plus fortement la marge brute globale puisque leur baisse simultanée accentue davantage la rareté de l'eau à usage agricole. Une des stratégies d'adaptation à cette rareté généralisée de l'eau à usage agricole est d'irriguer les cultures pluviales en diminuant le volume d'eau apportée aux cultures irriguées.

La forte baisse de la marge brute globale suite à une réduction de l'eau de pluie et du volume prélevable de 20% combinée à une diminution des primes au titre de la PAC de 3% est due au fait que l'impact de la baisse des aides de la PAC vient s'ajouter à l'impact d'une diminution de l'eau de pluie et du volume prélevable sur la marge brute globale. L'impact marginal de la baisse des aides de la PAC est ainsi évalué à l'ordre de 0.27%. Ce résultat conforte quelque peu l'idée selon laquelle les exploitations agricoles françaises seraient dépendantes des primes au titre de la politique agricole commune.

b. Commentaires des résultats du modèle de long terme

A long terme, nous nous attendions à une modification des assolements qui consisterait à réduire les surfaces des cultures gourmandes en eau (le maïs) au profit des cultures moins exigeantes en eau d'irrigation (le pois par exemple). Cependant, les sorties de notre modèle à l'issue des différentes simulations sur la rareté de l'eau ne sont pas en phase avec cette stratégie d'adaptation des exploitations agricole face au manque d'eau dans un contexte de changement climatique

Il faudra donc retourner au modèle afin de revoir le travail de calibrage pour que le modèle reflète au mieux la révision des assolements comme stratégie agricole face à la rareté de l'eau.

IV. LIMITES ET PERSPECTIVES

1. Limites

Il convient de souligner que les modèles ne sont qu'une représentation simplifiée du comportement réel des agriculteurs, et que ceux-ci peuvent poursuivre d'autres objectifs autres que des objectifs économiques (Bernsten et al., 2003).

Ainsi, un écart d'assolement, de volume d'irrigation et/ou de marge brute constaté entre les résultats des simulations et les observations réelles de ces variables n'est pas nécessairement dû à une mauvaise spécification du modèle mais plutôt à l'aversion relative au risque de variation de revenu de la part des agriculteurs en raison des aléas climatiques ou de l'incertitude liée à la disponibilité des facteurs de productions. (Loubier, 2003).

Par ailleurs, Loubier (2003) précise que la capacité du modèle à reproduire le comportement des agriculteurs dépend de l'exhaustivité et de la fiabilité des données recueillies.

Force est de constater que pour cette étude, nous n'avons disposé que de données partielles et sur une seule exploitation. En outre, nous n'avons pas pu mobiliser les données sur longues périodes pour des raisons de disponibilité de ces données en question. Toutes ces contraintes nous ont quelques fois conduits à opérer des choix de nature à limiter quelque peu la portée du travail. Par exemple, nous avons estimé la productivité de l'eau sur une seule année. Or il serait certainement plus intéressant d'estimer cette productivité sur longues périodes afin de capter au mieux l'intensité de la relation entre rendement et eau sur notre exploitation d'étude pour chacune des cultures.

Dans ce travail, nous avons bâti un modèle économique statique. Cela suppose que nous ne prenons pas en compte les interactions entre les variables économiques actuelles de l'exploitation

agricole et leurs valeurs passées ou avec les valeurs passées d'autres variables. Or le rendement à la date t peut être fonction de l'eau d'irrigation apportée en $t-1$ et du rendement en $t-1$ (voir Reynaud, 2006 pour plus de détails à ce sujet).

Nous n'avons pas testé le modèle avec les données d'une autre exploitation agricole en Bourgogne, en d'autres termes, nous n'avons pas vérifié la robustesse du modèle et de nos résultats avec les données d'une autre exploitation agricole ayant sensiblement les mêmes caractéristiques que l'exploitation agricole retenue pour cette étude.

2. Perspectives

Il serait donc intéressant dans le prolongement de ce travail, de mobiliser davantage de données sur l'exploitation agricole d'étude et de tenter de prendre en compte la question de l'aversion au risque de variation du revenu. En France, Cette question reste peu explorée dans le cadre de travaux de recherche sur les stratégies d'adaptation au changement climatique faisant intervenir l'eau d'irrigation.

A cet effet, l'on pourrait s'inspirer des travaux de Reynaud (2006) sur la prise en compte de l'aversion au risque de variation du revenu agricole.

Etant donné l'incertitude liée au revenu en raison des aléas climatiques notamment, Reynaud (2006) suppose que le coefficient d'aversion relative au risque (coefficient d'Arrow-Pratt) des agriculteurs est constant. Il va proposer un programme d'optimisation dans lequel l'agriculteur cherche à maximiser l'utilité retirée de son profit ou de sa marge brute. Pour prendre en compte le risque, il exprime cette utilité du profit des agriculteurs à travers une forme fonctionnelle couramment utilisée en économie de l'incertain selon la relation:

$U(\pi) = [1 / (1-a)] \pi^{1-a}$, avec a = coefficient d'aversion relative au risque et π = profit, U = utilité. En rapport avec la littérature, Reynaud (2006) choisit un coefficient d'aversion relative au risque égal à 0.2 pour mener son analyse.

Par ailleurs, l'on pourrait songer à rendre le modèle dynamique pour prendre en compte les interactions entre valeurs passées et valeurs actuelles d'une même variable ou entre différentes variables. On pourra par exemple écrire le rendement à la date d'aujourd'hui comme une fonction de l'eau de pluie d'hier.

Il serait en outre intéressant dans la continuité de ce travail, d'envisager le couplage du modèle économique que nous avons bâti avec un modèle biophysique qui lui prend en compte les caractéristiques des sols, le climat, et l'eau et l'itinéraire technique. Dès lors, Les sorties du modèle biophysiques serviront d'entrées au modèle économique. Le modèle biophysique SWAT qui est en cours de calibrage dans le cadre du projet HYCCARE pourrait être mobilisé à cet effet.

Aussi, serait-il judicieux de tester la robustesse de notre modèle avec une autre exploitation agricole ou avec des données moyennes d'un ensemble d'exploitations agricole. L'on pourrait se rapprocher davantage des chambres d'agriculture pour obtenir de celles-ci, dans le cadre d'une convention, des données d'exploitations agricoles type INOSYS élaborées par ces chambres pour les études et le conseil sur les exploitations agricoles.

CONCLUSION

Notre étude s'est voulue prospective : elle a cherché d'une part à déterminer l'impact de la rareté de l'eau sur l'économie de l'exploitation agricole et d'autres part à identifier et à analyser les stratégies que pourraient mettre en place les exploitants agricoles en vue d'assurer leurs revenus au cas où les quantités d'eau disponible pour l'irrigation se trouveraient limitées en raison du changement climatique avec son corollaire de pression sur les ressources en eau.

A partir d'un modèle de programmation linéaire volontairement simplifiée et calibré sur une seule année avec des données d'une seule exploitation agricole, nos investigations ont montré que la baisse du volume maximum prélevable pour l'irrigation réduit considérablement la marge brute globale de l'exploitant agricole plus qu'une baisse de la pluviométrie. Par ailleurs, en courte période, lorsque les agriculteurs ont déjà réalisé les assolements, ceux-ci font face à l'insuffisance de l'eau agricole en ayant recours à l'irrigation des cultures pluviales au prix d'une réduction du volume apporté aux cultures irriguées. Ce faisant, les exploitants agricoles acceptent comme stratégie d'adaptation à la rareté de l'eau une diminution des rendements de cultures moins que proportionnelle à la diminution des apports en eau d'irrigation occasionnée par le manque d'eau dans un contexte de changement climatique telle que préconisée par l'ONERC.

A long terme, outre les apports en eau d'irrigation, l'exploitant agricole dispose d'une variable de décision supplémentaire pour faire face au manque d'eau: les assolements. Il cherchera donc à modifier les assolements en pratiquant davantage des cultures moins consommatrices en eau au détriment de celles qui sont gourmandes en eau. Nous attendions du modèle économique de long terme que nous avons construit qu'il reflète cette réalité agricole. Mais ce ne fut pas le cas. Un travail supplémentaire de calage et de complexification de ce modèle doit se faire en intégrant par exemple l'aversion relative au risque de variation de revenu des agriculteurs dans le but que le modèle puisse reproduire la stratégie d'adaptation à l'insuffisance de l'eau par révision des assolements.

En somme, l'originalité de notre travail a été de construire un modèle adapté à une situation réelle où volumes d'eau d'irrigation et assolements sont au cœur du processus décisionnel d'adaptation des exploitations agricoles au changement climatique. Ceci est une originalité en Bourgogne dans un contexte de changement climatique.

BIBLIOGRAPHIE

Agreste Bourgogne (2013). L'agriculture en Bourgogne. Agreste Bourgogne n°157.

Agreste Bourgogne (2012). Recensement agricole 2010. Agreste Bourgogne n°139.

Agreste Bourgogne (2012). Les aides directes à l'agriculture Bourguignonne: un budget régional en légère baisse bénéficiant toutefois à l'agriculture. Agreste Bourgogne n°127.

Agreste-recensement agricole (2010). Ministère de l'agriculture de l'agroalimentaire et de la forêt: Agreste la statistique, l'évaluation, et la prospective agricole. [En ligne] (Page consultée le 01/08/2014) disponible sur <http://agreste.agriculture.gouv.fr/en-region/bourgogne/>.

Alterre Bourgogne (2009) L'impact du changement climatique sur la ressource en eau. Repères, périodique d'Alterre Bourgogne, n°53.

Alterre Bourgogne (2010). Adaptation au changement climatique : évaluation de la réserve en eau des sols, Rapport technique.

Alterre Bourgogne (2012) Adaptation au changement climatique en Bourgogne et grandes cultures, Dossier thématique.

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

Bergez, J-E., Deumierb, J-M., Lacroix, B., Leenhardt, D., Leroy, P., Wallach, D. (2002). Improving irrigation schedules by using a biophysical and a decisional model, *European Journal of agronomy*, n°16 (2), p 123-135.

Berntsen, J., Petersen, B.M., Jacobsen, B.H., Olesen, J.E., Hutchings, N.J. (2003). Evaluating nitrogen taxation scenarios using the dynamic whole farm simulation model FASSET, *Agricultural Systems*, n°76, p 817-839.

Boccanfuso, D., Savard, L., Goyette, J., Grosselin V., Mangoua, C., T. (2014). Analyse économique des impacts et de l'adaptation aux changements climatiques de l'industrie forestière québécoise à l'aide d'un modèle d'équilibre général de type micro-simulation. Rapport scientifique, Sherbrooke.

Boussard, J-M, Boussemart J-P., Flichman G., Jacquet, F., Lefer, H-B. (1997) Les effets de la réforme de la Pac sur les exploitations de grande culture: Changements techniques et renforcement des spécialisations régionales, *Économie rurale*, N°239, p.20-29.

Brisson, N., Levrault, F. (2010). Changement climatique, agriculture et forêt en France: simulation d'impacts sur les principales espèces. Le livre vert du projet climator (2007-2010). ADEME, 336p.

Brady, M. (2003). The relative cost-efficiency of arable nitrogen management in Sweden. *Ecological Economics*, n° 47 (1), p 53-70.

Brisson, N. (2010). Changement climatique et cultures de maïs et de sorgho: l'essentiel des impacts In Brisson N., Levrault F. (eds), Livre vert du projet CLIMATOR - Changement climatique, agriculture et forêt en France : simulations d'impacts sur les principales espèces ; ADEME, p 141-154.

Campariol, L. (2009). Le climat fait stagner les rendements. Semences et Progrès, n°.141, p 2-3.

Chambre d'agriculture de la Nièvre, agriculture et territoires [en ligne], (page consultée le 28/07/2014) <http://www.nievre.chambagri.fr/productions-vegetales.html>).

CRAB (2011).Entretien téléphonique: Marie Sophie Petit, service territoire, environnement, énergie, climat et productions végétales, Chambre régionale d'agriculture de Bourgogne.

Ducharne, A. (2012). Que peut-on dire de l'évolution des ressources en eau au cours des prochaines décennies en réponse au changement climatique? Journée SMF « prévisions météorologique et hydrologique ». 20 Novembre 2012, Paris.

Duprez, C., Aram, Y., Chemery, B. (2010), le bassin versant de la Tille carte d'identité: Gouvernance, territoires de projets et milieux humains, Actéon environment research & consultancy.

European Commission (2000). Environment [en ligne] (page consultée le 31/07/2014) Disponible sur http://ec.europa.eu/environment/water/water-framework/objectives/index_en.htm.

Flichman, G., Louhichi, K., Zekri, S.(1999). Un modèle bioéconomique pour analyser l'impact de la politique de conservation des eaux et du sol: Le cas d'une exploitation agricole tunisienne *Économie rurale*. n° 252, p. 55-64.

Gate, P., et al. (2011).Changement climatique- Impact sur le blé en France et pistes d'adaptation. *Perspectives agricoles*, n° 374, p 54-58.

GIEC (2007). Bilan 2007 des changements climatiques, contribution des groupes de travail I, II, et III au quatrième rapport d'évaluation du groupe intergouvernemental sur l'évolution du climat, Genève, Suisse, 103p.

Gohin, A. (2002). Les propositions de révisions à mi-parcours de la politique agricole commune: Evaluation des impacts sur l'agriculture française à partir du modèle MEGAAF, INRA Rennes, Research report 02-01:149.

Gohin, A., Guyomard, H., Levert, F. (1999). Impacts économiques d'une réduction des utilisations des engrais minéraux en France: Analyse en équilibre général. WP INRA-ESR.

Graveline, N., Mérel, P. (2014). How do farmers adapt to water scarcity? Intensive Margin Adjustments in Beauce. *European Review of Agricultural Economics*, p. 1–37.

Graveline, N., Rinaudo, J-D., Loubier, S., Segger, V. (2009) L'évolution de la pollution agricole des eaux souterraines, *Économie rurale* [En ligne] (page consultée le 21 août 2014). Disponible sur : <http://economierurale.revues.org/2136>.

Loubier, S. (2003). Modélisation du comportement des agriculteurs: Revue de littérature Rapport final BRGM/RP-53172-FR 30p.

Kobrich, C., Rehman, T., Khan, M. (2003). Typification of farming systems for constructing representative farm models: two illustration of application of multivariate analyses in Chile and Pakistan. *Agricultural Systems*, n° 76, p 141-176.

Klatzmann, J. (1959) La technique des programmes linéaires peut-elle être appliquée à la gestion des exploitations agricoles ? *Économie rurale*, n° 42, p. 11-16.

ONERC (2009) Changement climatique coût des impacts et pistes d'adaptation, rapport au premier ministre et au parlement, paris: La documentation Française.

Pays Bourgogne Nivernaise (2013). Présentation de la démarche « Contrat de Rivière » et des premiers éléments de diagnostic à l'échelle du Nohain. 05 Mars 2013, Donzy, 18p.

PNACC (2010) Programme national d'adaptation au changement climatique [en ligne] (page consultée le 23 juillet 2014). Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et de l'énergie. Disponible sur http://www.developpement_durable.gouv.fr/IMG/pdf/ONERC-PNACC-complet.pdf).

Reilly, J. (2002). The Potential Consequences of Climate Variability and Change: A Report of the National Agriculture Assessment Group for the US Global Change Research Program. *Cambridge University Press*, Cambridge, 150 p.

Reynaud, A. (2006). Impacts marchands, non marchands et structurels des reformes politiques agricoles et agri-environnementales, DT n°1 du projet IMPACTS.

Ruben, R., Moll, H., Kuyvenhoven, A. (1998). Integrating agricultural research and policy analysis: analytical framework and policy applications for bio-economic modeling. *Agricultural systems*, n° 58 (3), p 331-349.

Sabatier, J., L., Ruf, T., LE Goulven, P., Durango, M., Carrion, Y. (1992). Modélisation de l'économie agricole dans un espace irrigué construction d'un modèle économique annuel avec Gams: Fonctionnement de l'irrigation traditionnelle dans les Andes équatoriennes recommandations pour le plan national d'irrigation Série 18, Volume Méthodologique. Tome J.

Sitiv. Contrat de bassin Tille [en ligne](page consultée le 04/09/2014).Disponible sur: <http://chaignay.fr/sitiv.pdf>.

US environmental agency les techniques d'irrigation simples et efficaces [en ligne], (page consultée le 16/06/2014) disponible sur: Wikiwater, <http://www.wikiwater.fr/e52-les-techniques-d-irrigation.html>

Vert, J., Schaller, N., Villien, C. (2013). Agriculture Forêt Climat : vers des stratégies d'adaptation. Centre d'études et de prospective, Ministère de l'Agriculture, de l'Agroalimentaire et de la Forêt.

ANNEXES

Annexe1: Données économiques brutes issues de l'enquête

Années	Cultures	Surface(ha)	Rendement(q/ha)	Prix (euro/q)	Pac(euro/ha)	Produit brut(euro)	Eau(m3)	Charges(euro/ha)	MB(euro/ha)
2007	blé	51,3	62	16	80,2	1072,2		281	791,2
2007	orge hiver	78	65	16,5	80	1152,5		267	885,5
									0
2008	blé	50,1	68,5	13	78	969	0	365.5	603.5
2008	orge hiver	18,7	67,6	12,4	78	1024	0		956
2008	colza	12,7	34	32	78	1166	0		1150
2008	orge p.	11,5	60	18	102	1182	0		1092
2008	maïs	29	103,5	14	78	1527	26680	342.8	1184.2
2008	pois	9,2	45	15	130	805	0	384.9	420.1
2009	blé	44,72	70						6153
2009	orge hiver	10,13	65						3911
2009	orge p	12,77	59						
2009	maïs grain	32,96	110				49970		
2009	pois protea	8,82	35						
2010	blé tendre	56,07	65,6	14,369					
2010	maïs grain	22,51	105,3	15,269					
2010	colza hiver	19,33	30,6	29,482					
2010	pois	12,84	47,5	10					
2010	orge hiver	12,53	81	11,685					
2010	orge p	6,13	43,9	12,666					
2011	blé tendre	53	80	17					

2011	mais grain	39	130	15			34540		
2011	colza hiver	7,1	70	33,5					
2011	pois protea	14	46	18,4	171,9				
2011	orge hiver	9,8	70	17					
2011	orge p	8	66	19					
2012	ble tendre	43,28	70,9	18,748			0		
2012	mais grain	40	107,3	17,821			47520		
2012	colza hiver	18,3	28,2	46,097			13750		
2012	pois protea	13	38,9	23,04			0		
2012	orge hiver	10	85,9	17,077			0		
2012	orge p.	8,5	64,1	17			0		
2013	blé tendre	53,32	80,7	16,223			0		
2013	mais grain	42	105,2	11,733			55000		
2013	colza hiver	19	28,5	36,647			0		
2013	pois protea	11	45	14			0		
2013	orge hiver	7,14	70	14			0		
2013	avoine p.	1	40	10			0		

Source: Enquête de l'exploitation agricole étudiée, Juin 2014.

Annexe 2: Données économiques de l'exploitation

Nom	culture	année	surface	RDT	PRIX	PRIX Agri	Aide PAC protéagineux	Aides MAE, CTE...	Indemnités grêle	DPU	total aides	PRODUIT BRUT	PRODUIT BRUT Agri
GIB	BLE	2008	50,1	68,5	13,0	13,0	78,0			0,0	78,0	969	969
GIB	ORGE H	2008	18,7	67,6	14,0	12,4	78,0			0,0	78,0	1024	916
GIB	COLZA	2008	12,7	34,0	32,0	32,0	78,0			0,0	78,0	1166	1166
GIB	OURNESCO	2008	0,0		30,0					0,0	0,0		
GIB	ORGE P	2008	11,5	60,0	18,0	18,0	102,0			0,0	102,0	1182	1182
GIB	MAIS	2008	31,0	103,5		14,0	78,0			0,0	78,0		1527
GIB	POIS	2008	9,2	45,0	15,0	15,0	130,0			0,0	130,0	805	805
GIB		2008	0,0							0,0	0,0		
GIB	JACHERE	2008	0,0				341,0			0,0		341	341
GIB	BLE	2007		62,0	16	16	80,2	3	101,5	0,0		1177	1177
GIB	ORGE H	2007		65,0	16,5	16,5	80	0	231	0,0		1384	1384

		Total Semence	N(kg)	P(kg)	K(kg)	S(kg)	MG(kg)	Ferti min
BLE	2008	67,0	195,0	48,0	0,0	48,0	0,0	174,0
ORGE H	2008	68,0	129,0	70,0	0,0	70,0	0,0	172,0
COLZA	2008	16,0	187,0	92,0	0,0	92,0	0,0	244,0
JOURNESC	2008							
ORGE P	2008	89,6	128,0	0,0	0,0	0,0	0,0	102,0
MAIS	2008	157,0	100,0	0,0	0,0	0,0	0,0	86,0
POIS	2008	122,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
	2008							
JACHERE	2008							
BLE	2007	51,3	170	0	0	76	40	116
ORGE H	2007	78	145	0,0	0	55	29	96

Source: Chambre d'agriculture de la Nièvre.

Annexe.3: Compte rendu du Skype avec Arnaud VAUTIER, conseiller irrigation à la chambre départementale d'agriculture de la Nièvre

Le vendredi 23 Mai 2014, Hélène TOUSSAINT et moi avons eu des échanges via skype avec Arnaud VAUTIER, conseiller irrigation à la chambre d'agriculture de la Nièvre.

Les échanges ont principalement porté sur l'irrigation dans la Bourgogne Nivernaise et dans le Nohain.

Hélène a brièvement présenté HYCCARE et a répondu à quelques questions d'Arnaud sur le modèle hydro-climatique.

J'ai présenté mon sujet et la problématique associée: l'impact de la rareté de l'eau d'irrigation sur la marge brute des exploitations agricoles et les stratégies d'adaptation à l'insuffisance d'eau à certaines périodes clés du cycle cultural.

Il faut rappeler que Arnaud avait déjà pris connaissance du projet HYCCARE et de mon thème à travers des documents de synthèse que je lui avais envoyé 5 jours avant l'entretien.

Se prononçant sur ma problématique, Arnaud a d'entrée de jeu souligné que la pression de l'irrigation sur le Nohain n'est pas énorme. L'irrigation augmente très peu. On enregistre en moyenne par an une ou 2 forages. En gros, pour le moment il n'y a pas de conflits ou de pression sur la ressource en eau dans le Nohain.

Concernant les statistiques, Arnaud a dit qu'il ne possède que des données sur l'irrigation qui vont de 2006 à 2013. Pour les données économiques (marge brute, PAC, charges opérationnelles...), il nous a suggéré de contacter Youna conseillère agricole à la chambre d'agriculture de la Nièvre. Toutefois, si nous souhaitons enquêter auprès d'un irrigant pour recueillir des données économiques, il nous a conseillé Hervé JOHANNET qui fut président des irrigants. Mais, pour lui il serait intéressant d'avoir des données moyennes à l'échelle du bassin versant ou du département sauf si nous souhaitons mener notre étude à l'échelle d'une seule exploitation du BV du Nohain.

Sur le coût de l'irrigation, Arnaud dit être démuni, toutefois, il a signalé que le coût de l'eau d'irrigation se compose du coût du matériel d'irrigation, du coût de l'électricité, de la redevance payée à l'Etat.

En moyenne, une exploitation agricole paie 1500 euro par an au titre des redevances. Les frais d'électricité vont de 5000 à 10.000 euro par an.

Le prix du m³ d'eau s'élève à environ 0.045euro.

A la question: y a t-il une relation entre l'eau d'irrigation et le rendement?, le conseiller irrigation a répondu que l'eau d'irrigation a un impact sur le rendement agricole. D'ailleurs, les exploitants qui le sollicitent pour des forages en vue d'irriguer avancent l'argument d'une volonté d'augmenter le revenu en augmentant le rendement. En outre, ces exploitants s'orientent vers l'irrigation en raison de la forte inquiétude face au changement climatique.

Le besoin moyen en eau d'irrigation pour une année dans le Nohain est de 1million et demi pour une surface irriguée d'environ 1500 et 2000ha. Le maïs, culture consommatrice d'eau en été, consomme 50% de ce volume d'eau.

1 printemps sur 3 est irrigué ces dernières années.

Au terme de l'entretien, il a été convenu que j'envoie un mail à Arnaud pour clarifier les données irrigation dont j'ai besoin pour qu'il me les envoie au cours de la première semaine du mois de juin.

Les données dont dispose Arnaud sont relatives à la quantité d'eau d'irrigation par culture, par source et par surface irriguée pour chaque année. Ces données sont pour l'ensemble de tous les bassins versants de la Nièvre. Cependant, il serait possible d'obtenir spécifiquement celles qui se rapportent au BV du Nohain.

Nous travaillerons sur deux exploitations: une sur le Nohain où il n'existe pas de contraintes véritables à l'heure actuelle, et l'autre sur la Tille inscrite en ZRE.

Pour la Tille j'ai déjà envoyé un mail à Laure OHLEYER conseillère à la chambre d'agriculture de la Côte d'Or pour une rencontre. J'attends le retour de ce mail.

Je tenterai d'avoir le plus rapidement possible un Rendez-vous avec l'irrigant Hervé de la Nièvre en attendant que Youna me contacte à la suite d'un mail qu'Hélène lui a envoyé.

Annexe 4: Historique des doses hectare par culture de l'exploitation type de Bourgogne Nivernaise

culture	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013
maïs grain	861	954	1 458	1 766	1 227	1 678	1 678
pois de printemps	578	236	377	437	680	0	0
orge de printemps	642	394	520	541	978	348	348
blé tendre	486	353	468	464	825	387	387
colza	267	250	0	0	0	330	330
Moyenne	686	740	1 113	1 265	1 016	1 014	1 599

Source: Chambre d'agriculture de la Nièvre

Annexe 5: Compte rendu d'enquête

Le Mercredi 04 Juin 2014, nous avons effectué une enquête auprès de l'exploitant agricole Fabien GIBOURET afin de recueillir des données économiques de son exploitation et échanger avec lui sur les questions liées à l'irrigation dans un contexte de changement climatique.

Nous avons pu recueillir des données sur les assolements, es marges brutes, les volumes prélevable, les prix de ventes des cultures, les volumes d'eau apportée aux cultures.

Ces informations sont consignées dans les comptes globaux (bilan, compte de production, balance...) de l'exploitation. Par souci d'efficacité, nous avons procédé à la photocopie des parties de chaque document comptable et administratif de l'exploitation qui pourraient servir pour notre étude.

Après l'enquête j'ai procédé au dépouillement de ces données en les classant selon la grille de lecture des exploitations- type du système ROSACE.

L'exploitation enquêtée, dénommée LA MARQUISE se situe en Bourgogne Nivernaise non loin de la localité de Entrains sur Nohain avec un sol à bon potentiel agronomique aux dires de l'exploitant agricole.

Les données collectées couvrent les campagnes 2008 à 2013. Cependant, il n'a pas été possible de retrouver la répartition des charges opérationnelles, des marges brutes et des volumes irriguées par culture. Nous avons plutôt relevé les valeurs globales de ces différentes variables à l'échelle de l'exploitation.

En ce qui concerne l'irrigation, l'exploitant agricole a souligné que l'irrigation constitue un moyen de se couvrir contre les aléas climatiques. Il a par ailleurs indiqué que si le volume maximal prélevable diminue fortement, la stratégie d'adaptation consistera à revoir les assolements en s'orientant de plus en plus vers des cultures moins consommatrice d'eau comme le colza au détriment du maïs.

Concernant les caractéristiques du sol de son exploitation, l'exploitant a précisé que c'est un sol à bon potentiel agronomique, un sol argileux avec moins de cailloux.

J'ai donc pris un rendez-vous avec Arnaud Vautier et Youna Girault le jeudi 12 Juin à Nevers pour échanger sur les chiffres que nous avons collectés et tenter de trouver des données complémentaires sur cette exploitation.

Annexe 6: Rapport des réponses des différentes simulations réalisées avec le modèle de court terme

Rapport des réponses du calage du modèle de court terme

Microsoft Excel 12.0 Rapport des réponses

Feuille: [calibrage CT.xlsx] calage court terme

Date du rapport: 09/09/2014 15:36:54

Cellule cible (Max)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$D\$65	fct objectif α	31871,72653	68413,57957

Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$51	i	0	0,001279492
\$G\$51	j	0	299,9325848
\$H\$51	k	0	0,01247505

Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$D\$57	irrigation α	8698,223834	\$D\$57<=\$F\$57	Non lié	1,776166499
\$G\$47	Rendements	103,5	\$G\$47<=103.5	Lié	0
\$F\$47	Rendements	68,5	\$F\$47<=68.5	Lié	0
\$H\$47	Rendements	45	\$H\$47<=45	Lié	0

Rapport des réponses de la simulation portant sur une baisse de 20% de l'eau de pluie avec le modèle de court terme

Microsoft Excel 12.0 Rapport des réponses

Feuille: [calibrage CT.xlsx] calage court terme

Date du rapport: 09/09/2014 15:41:28

Cellule cible (Max)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$D\$65	fct objectif α	21080,79122	67049,62339

Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$51	i	0	2,80567071
\$G\$51	j	0	294,2593354
\$H\$51	k	0	2,816866268

Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$D\$57	irrigation α	8700	\$D\$57<=\$F\$57	Lié	0
\$G\$47	Rendements	100,1416832	\$G\$47<=103.5	Non lié	3,358316787
\$F\$47	Rendements	68,5	\$F\$47<=68.5	Lié	0
\$H\$47	Rendements	45	\$H\$47<=45	Lié	0

Rapport des réponses modèle de court terme: Simulation sur la baisse de 20% du volume prélevable

Microsoft Excel 12.0 Rapport des réponses

Feuille: [calibrage CT.xlsx] calage court terme

Date du rapport: 09/09/2014 15:45:01

Cellule cible (Max)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$D\$65	fct objectif α	31871,72653	61112,93518

Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$51	i	0	0,001279492
\$G\$51	j	0	239,993832
\$H\$51	k	0	0,01247505

Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$D\$57	irrigation α	6960	\$D\$57<=\$F\$57	Lié	0
\$G\$47	Rendements	84,36215561	\$G\$47<=103.5	Non lié	19,13784439
\$F\$47	Rendements	68,5	\$F\$47<=68.5	Lié	0
\$H\$47	Rendements	45	\$H\$47<=45	Lié	0

Rapport des réponses: Simulation sur la baisse simultanée de l'eau de pluie et du volume prélevable

Microsoft Excel 12.0 Rapport des réponses

Feuille: [calibrage CT.xlsx] calage court terme

Date du rapport: 09/09/2014 15:49:00

Cellule cible (Max)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$D\$65	fct objectif α	21080,79122	59741,51899

Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$51	i	0	2,80567071
\$G\$51	j	0	234,2593354
\$H\$51	k	0	2,816866268

Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$D\$57	irrigation α	6960	\$D\$57<=\$F\$57	Lié	0
\$G\$47	Rendements	80,98428321	\$G\$47<=103.5	Non lié	22,51571679
\$F\$47	Rendements	68,5	\$F\$47<=68.5	Lié	0
\$H\$47	Rendements	45	\$H\$47<=45	Lié	0

Rapport des réponses: Simulation portant sur une baisse de l'eau de pluie et du volume prélevable de 20% combinée à une baisse du montant des primes de la PAC de 3%

Microsoft Excel 12.0 Rapport des réponses

Feuille: [calibrage CT.xlsx] calage court terme

Date du rapport: 10/09/2014 13:20:29

Cellule cible (Max)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$D\$65	fct objectif α	20895,69722	59556,42499

Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$F\$51	i	0	2,80567071
\$G\$51	j	0	234,2593354
\$H\$51	k	0	2,816866268

Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$D\$57	irrigation α	6960	\$D\$57<=\$F\$57	Lié	0
\$G\$47	Rendements	80,98428321	\$G\$47<=103.5	Non lié	22,51571679
\$F\$47	Rendements	68,5	\$F\$47<=68.5	Lié	0
\$H\$47	Rendements	45	\$H\$47<=45	Lié	0

Annexe 7: Rapport des réponses des simulations avec le modèle de long terme

Rapport des réponses du calage du modèle de long terme

Microsoft Excel 12.0 Rapport des réponses

Feuille: [fichier de calage LT.xlsx]calage long terme

Date du rapport: 09/09/2014 16:04:54

Cellule cible (Max)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$C\$21	Fct Objectif	0	68444,08432

Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$2	x	0	51,42857143
\$F\$2	y	0	28,98550725
\$G\$2	z	0	12,98701299
\$E\$8	a	0	0
\$F\$8	b	0	300
\$G\$8	d	0	0

Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$C\$13	terre	93,40109166	\$C\$13<=\$E\$13	Non lié	39,59890834
\$C\$14	eau irrigation	8695,652174	\$C\$14<=\$E\$14	Non lié	4,347826087
\$G\$17	travail pois	180	\$G\$17<=\$I\$17	Lié	0
\$G\$18	pois	50	\$G\$18<=\$I\$18	Lié	0
\$G\$20	pois	100	\$G\$20<=\$I\$20	Lié	0
\$F\$4	Rendements mais	103,5	\$F\$4=103.5	Non lié	0
\$E\$4	Rendements blé	68,5	\$E\$4=68.5	Non lié	0
\$G\$4	Rendements pois	45	\$G\$4=45	Non lié	0

Rapport des réponses d'une baisse de 20% de l'eau de pluie avec le modèle de long terme.

Microsoft Excel 12.0 Rapport des réponses

Feuille: [fichier de calage LT.xlsx]calage long terme

Date du rapport: 09/09/2014 16:10:27

Cellule cible (Max)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$C\$21	Fct Objectif	0	51650,23508

Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$2	x	0	51,42857143
\$F\$2	y	0	28,98550725
\$G\$2	z	0	12,98701299
\$E\$8	a	0	0
\$F\$8	b	0	300,15
\$G\$8	d	0	0

Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$C\$13	terre	93,40109166	\$C\$13<=\$E\$13	Non lié	39,59890834
\$C\$14	eau irrigation	8700	\$C\$14<=\$E\$14	Lié	0
\$G\$17	travail pois	180	\$G\$17<=\$I\$17	Lié	0
\$G\$18	pois	50	\$G\$18<=\$I\$18	Lié	0
\$G\$20	pois	100	\$G\$20<=\$I\$20	Lié	0
\$E\$4	Rendements blé	54,8	\$E\$4<=68.5	Non lié	13,7
\$F\$4	Rendements maïs	89,01	\$F\$4<=103.5	Non lié	14,49
\$G\$4	Rendements pois	36	\$G\$4<=45	Non lié	9

Rapport des réponses: baisse du volume prélevable, modèle de long terme

Microsoft Excel 12.0 Rapport des réponses

Feuille: [fichier de calage LT.xlsx] calage long terme

Date du rapport: 09/09/2014 16:14:32

Cellule cible (Max)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$C\$21	Fct Objectif	0	66404,02213

Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$2	x	0	51,42857143
\$F\$2	y	0	28,98550725
\$G\$2	z	0	12,98701299
\$E\$8	a	0	0
\$F\$8	b	0	240,12
\$G\$8	d	0	0

Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$C\$13	terre	93,40109166	\$C\$13<=\$E\$13	Non lié	39,59890834
\$C\$14	eau irrigation	6960	\$C\$14<=\$E\$14	Lié	0
\$G\$17	travail pois	180	\$G\$17<=\$I\$17	Lié	0
\$G\$18	pois	50	\$G\$18<=\$I\$18	Lié	0
\$G\$20	pois	100	\$G\$20<=\$I\$20	Lié	0
\$E\$4	Rendements blé	68,5	\$E\$4<=68.5	Lié	0
\$F\$4	Rendements mais	97,31787531	\$F\$4<=103.5	Non lié	6,182124688
\$G\$4	Rendements pois	45	\$G\$4<=45	Lié	0

Baisse simultanée de l'eau de pluie et du volume prélevable à long terme

Microsoft Excel 12.0 Rapport des réponses

Feuille: [fichier de calage LT.xlsx] calage long terme

Date du rapport: 09/09/2014 16:19:07

Cellule cible (Max)

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$C\$21	Fct Objectif	0	49605,06252

Cellules variables

Cellule	Nom	Valeur initiale	Valeur finale
\$E\$2	x	0	51,42857143
\$F\$2	y	0	28,98550725
\$G\$2	z	0	12,98701299
\$E\$8	a	0	0
\$F\$8	b	0	240,12
\$G\$8	d	0	0

Contraintes

Cellule	Nom	Valeur	Formule	État	Marge
\$C\$13	terre	93,40109166	\$C\$13<=\$E\$13	Non lié	39,59890834
\$C\$14	eau irrigation	6960	\$C\$14<=\$E\$14	Lié	0
\$G\$17	travail pois	180	\$G\$17<=\$I\$17	Lié	0
\$G\$18	pois	50	\$G\$18<=\$I\$18	Lié	0
\$G\$20	pois	100	\$G\$20<=\$I\$20	Lié	0
\$E\$4	Rendements blé	54,8	\$E\$4<=68.5	Non lié	13,7
\$F\$4	Rendements mais	82,81238903	\$F\$4<=103.5	Non lié	20,68761097
\$G\$4	Rendements pois	36	\$G\$4<=45	Non lié	9