

CIHEAM



Centre
International
de Hautes Etudes
Agronomiques Méditerranéennes

International
Centre for
Advanced
Mediterranean Agronomic Studies

Thèse / Thesis

requis pour
l'obtention du Titre

submitted
for the Degree of

Master of Science

**Modèles de simulation
de l'agriculture d'un bassin
versant, application au
bassin Aveyron-Lère**

Gema Carmona

Série "Master of Science" n°77
2005

**Institut Agronomique Méditerranéen de
Montpellier**



**Prix de la meilleure thèse
Master of Science du CIHEAM
2005**

**Modèles de simulation
de l'agriculture d'un bassin
versant, application au
bassin Aveyron-Lère**

Gema Carmona

Série "*Master of Science*" n°77
2005

**Modèles de simulation de l'agriculture d'un bassin versant :
application au bassin Aveyron-Lère**

Gema Carmona

Série "*Master of Science*" n°77
2005

Cette thèse a obtenu le prix de la meilleure thèse du CIHEAM 2005

Série Thèses et Masters

Ce *Master* est le numéro 77 de la série *Masters of Sciences* de l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier.

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

La thèse *Master of Science* du Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes :

Modèles de simulation de l'agriculture d'un bassin versant : Application au bassin Aveyron-Lère.

a été soutenue par Gema Carmona en juin 2004 devant le jury suivant :

M. M. Allaya, enseignant-chercheur, CIHEAM-IAM Montpellier,	Président
M. P. Le Goulven, directeur US-DIVHA IRD	Membre
M. P. Garin, responsable Unité de Recherche Irrigation, CEMAGRF, Montpellier	Membre
M.P. Le Grusse, enseignant-chercheur, CIHEAM-IAM Montpellier	Membre

Le travail de recherche a été encadré par M. P. Le Grusse.

Le texte a été mis en forme pour cette publication par l'Atelier d'édition de l'Institut de Montpellier.

CIHEAM-IAMM Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier

Directeur : Vincent Dollé

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

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

Ces opinions n'engagent que leur auteur

ISBN : 2-85352-328-4. ISSN : 0989-473X

Numéros à commander au :
CIHEAM-IAMM
Bureau des Publications
e-mail : balmefrezol@iamm.fr

Prix : 50 €

© CIHEAM, 2005

**Modèles de simulation de l'agriculture d'un bassin versant :
Application au bassin Aveyron-Lère**

Gema Carmona

Série "*Master of Science*" n°77
2005

Fiche bibliographique

Carmona (Gema) – *Modèles de simulation de l'agriculture d'un bassin versant, application au bassin Aveyron-Lère* - Montpellier : CIHEAM-IAMM, 2005 – 107 p. (Master of Science soutenue à l'IAMM en 2004, Série Masters of Sciences, n°77)

Résumé : Pour la gestion de l'entreprise agricole, il est essentiel de prendre en compte les relations entre l'environnement socio-économique et l'environnement bio-physique. Dans notre travail, nous avons traité en particulier les problèmes de gestion de la ressource eau. L'agriculture consomme une bonne partie de la ressource et elle contribue à la détérioration de la qualité de l'eau en raison du lessivage de nitrates et de produits phytosanitaires. Notre cas d'étude se situe dans le bassin versant Aveyron aval – Lère, où les conflits d'usage autour de l'allocation et du maintien de la qualité de l'eau ont conduit les acteurs impliqués à souhaiter disposer d'éléments de réflexion sur les possibilités d'alternatives de production à l'agriculture actuelle notamment capables de réduire les volumes consommés et la lixiviation de nitrates au niveau du bassin. A partir des données individuelles des exploitations, nous avons développé un modèle régional de fonctionnement du bassin versant, issu du couplage d'un modèle bio-physique de simulation de cultures (CropSyst) avec un modèle agro-économique (Olympe). A partir de ce modèle régional, on a simulé des modifications possibles au niveau des pratiques agricoles afin d'analyser les différentes conséquences au niveau de l'ensemble du bassin. L'objectif de ce travail est (1) d'arriver à mieux comprendre les éléments du système qui interagissent entre eux et (2) de favoriser le dialogue entre les acteurs présents dans le processus de négociation. Les résultats obtenus témoignent de l'importance d'une action commune et nous engagent à des réflexions futures pour mener à bien une action entre les différents acteurs afin de préserver l'intérêt général.

Mots-clés : Aide à la décision collective, gestion de l'eau, modèle bio-physique, modèle agro-économique, simulations

Abstract: *In agricultural business management, an essential point is to take into account the relationship between the enterprise, its socio-economic environment and its physical environment. In this report, we have dealt with water resource management problems. Agriculture consumes an important part of the resource and it contributes to its quality deterioration due to pesticides residues and nitrates lixiviation. We took the example of the Aveyron - Lère basin, where the conflicts derived from water distribution and the preservation of its quality have led the stakeholders to wish to have elements to think on the possibilities of production alternatives to current agriculture in particular, able to reduce water consumption and nitrate lixiviation at basin level. Beginning with individual exploitations data, we have developed a regional model of the basin agriculture which consists on the link of a culture simulation biophysical model (CropSyst) and an agro-economic model (Olympe). The objective of the construction of our basin model is to get at better comprehension of the system elements and the relationship between them, in order to support the dialogue between the actors in their process of negotiation. Based on this model, we have simulated possible modifications in agricultural practices in order to appreciate the consequences at the basin level. The results obtained show the importance of a common and interactive action that should be carried out by the different actors in order to preserve the general interest.*

Keywords: *Collective decision-making, water management, bio-physical model, agro-economical model, simulation*

Remerciements

Au terme de ce travail, je tiens à témoigner mes remerciements à tous ceux qui m'ont aidée et encouragée à réaliser ma thèse et particulièrement :

Messieurs Jean-Marie Attonaty et Philippe Le Grusse, pour avoir accepté de diriger ce travail et pour leur soutien, leur aide efficace, les conseils et l'attention qu'ils m'ont prodigués tout au long de mon travail.

Mlle Marjorie Le Bars, pour l'aide essentielle qu'elle m'a accordée ; ses précieuses remarques et ses conseils judicieux m'ont permis de mener à bien ce travail.

Monsieur Mahmoud Allaya, pour son aide lors de la phase finale, qui a permis d'enrichir ce travail par ses remarques pertinentes

Messieurs Patrick Le Goulven et Patrice Garin, qui ont accepté de juger ce travail.

Mes remerciements vont aussi à mes collègues, M. Hatem Belhouchette et Rafik Mahjoubi, pour l'aide et le soutien que j'ai trouvés de leur part durant toutes les étapes de cette recherche et les conseils précieux qu'ils m'ont donnés.

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

Il y a aussi tous les amis que j'ai rencontrés à Montpellier, qui m'ont apporté leurs encouragements et leur soutien durant la réalisation de ce travail.

J'adresse également ma respectueuse reconnaissance à tous ceux qui ont contribué à mon travail et que je n'ai pas cités.

Table des matières

Liste des figures	10
Introduction	13
Partie I. Cadre du travail et présentation de la zone d'étude	17
Chapitre 1. La gestion de l'eau	17
I- Le problème de la gestion quantitative de la ressource	17
II- La gestion qualitative de la ressource	18
III- Textes légaux pour la gestion de la ressource eau	20
IV- Modes de coordination sociale pour la gestion des ressources. Place de l'expert dans le processus de négociation	23
Chapitre 2. Description de la zone d'étude	27
I- Situation géographique	27
II- Climat	27
III- Les régions naturelles	28
IV- Contexte hydrogéologique	30
V- Activité agricole	31
VI- Gestion de l'eau dans le bassin versant Aveyron-Lère	32
Chapitre 3. Problématique de l'étude et objectifs du travail	35
I- Problématique et objectifs du travail	35
II- Méthode et démarche générales	36
Partie II . Matériels et méthodes	41
Chapitre 1. Choix des outils	41
Chapitre 2. Obtention et analyse des données	43
I- Collecte des données	43
II- Détermination d'une typologie des exploitations	43
Chapitre 3. Construction d'un modèle régionale	49
I- Introduction	49
II- Modèle bio-physique : CROPSYST	49
III- Modèle agro-économique : Olympe	59
IV- Couplage modèle bio-physique et modèle agro-économique	71
Partie III. Simulation de scénarios et négociation	75
Chapitre 1. Choix des scénarios	75
Chapitre 2. Scénario 1: Optimisation de la fertilisation et de l'irrigation sans diminution des rendements	77
Chapitre 3. Scénario 2: Optimisation de la surface consacrée à chaque culture	91
Conclusion et perspectives	101
Bibliographie	105
Annexes	109

Liste des figures

Figures

Figure 1: Zones sensibles à l'eutrophisation en France, d'après la directive européenne du 21 mai 1991	20
Figure 2: Situation de la zone d'étude : territoire compris dans le contrat de rivière Aveyron aval - Lère....	27
Figure 3 : Schéma qui montre les outils utilisés dans notre travail et l'enchaînement entre eux	42
Figure 4 : Démarche pour la construction du modèle CropSyst.....	49
Figure 5 : Structure du simulateur CropSyst : données d'entrée et de sortie du modèle	50
Figure 6 : Fonctionnement de CropSyst : facteurs impliqués dans le calcul de l'accumulation de la biomasse	51
Figure 7 : Schéma qui représente l'organisation du simulateur Olympe et l'enchaînement entre les différentes rubriques	60
Figure 8 : Couplage des modèles biophysique et agro-économique. Données d'entrée et de sortie au niveau de chaque étape.	71

Tableaux

Tableau 1: Caractéristiques du sol, irrigation et cultures pratiquées dans les 5 régions agricoles qui composent le territoire du contrat de rivière Aveyron aval – Lère	29
Tableau 2: Bilan des prélèvements (millions de m ³) sur le bassin versant du contrat de rivière.....	31
Tableau 3: Utilisation du sol dans le département Tarn et Garonne.....	31
Tableau 4: Evolution des surfaces irriguée et irrigable du département Tarn et Garonne	32
Tableau 5: Superficies irrigables (ha) dans le département, Tarn et Garonne d'après les autorisations de prélèvement d'eau : superficie irriguée par chaque système d'irrigation et par chaque origine d'eau... 32	32
Tableau 6 : Strates de taille considérées pour la construction de la typologie des exploitations du bassin....	43
Tableau 7 : zones considérées pour la construction de la typologie des exploitations du bassin et type de sol présente dans chacune d'entre elles.	44
Tableau 8 : Classes de production définies pour l'élaboration de la typologie des exploitations du bassin. .	44
Tableau 9 : Nombre des exploitations, SAU et produit brut par classe de production dans le bassin.....	45
Tableau 10 : Nombre des exploitations par taille dans chaque classe de production	46
Tableau 11 : Sol argilo-calcaire (terreforts) [Revel JC (1982), thèse].....	52
Tableau 12 : Sol sablo-limoneux (alluvions) [INRA (1970), profil n°1]	52
Tableau 13 : Sol argilo-limoneux (boulbènes) [INRA (1989), profil P'8]	53
Tableau 14 : Précipitation totale annuelle et écart par rapport à la médiane. Données recueillies à la station météorologique de Montauban (1970-1991)	54
Tableau 15 : Valeurs retenues après calibrage du modèle pour les coefficients transpiration-biomasse, radiation-biomasse et indice foliaire pour chaque culture simulée avec CropSyst.....	55
Tableau 16 : Données de sortie retenues des simulations pour la culture du maïs grain : date de semis, date de récolte, rendement (kg/ha), irrigation (mm), azote apporté (kg/ha) et azote lixivié (kg/ha) pour chaque type de sol et pour les trois années type considérées (année humide 1971, année moyenne 1975 et année sèche 1990) Les données d'entrée sont date de semis et dose d'irrigation et d'azote apporté d'après les fiches de culture fournies par le groupe de pilotage. La date de récolte, le rendement et la lixiviation ont été générés par le modèle.....	57
Tableau 17: Azote produit par les différents types d'élevage (kg N / tête*an)	61
Tableau 18 : Calage du modèle Olympe : comparaison entre les superficies de chaque culture obtenues dans le modèle et les valeurs réelles obtenues à partir des enquêtes (en ha)	62
Tableau 19: Sorties du modèle Olympe : valeurs agrégées de la consommation d'eau totale et consommation d'eau par ha irriguée dans chaque zone.....	66
Tableau 20: Sorties du modèle Olympe: valeurs agrégées de la consommation d'azote totale et consommation d'azote par ha dans chaque zone	67

Tableau 21: Sorties du modèle Olympe : valeurs agrégées de la lixiviation totale et lixiviation par ha dans chaque zone	67
Tableau 22: Sorties du modèle Olympe : valeurs agrégées du stock d'azote total et du stock par ha dans chaque zone	67
Tableau 23: Sorties du modèle Olympe : valeurs agrégées de la marge brute totale et marge brute par ha dans chaque zone	67
Tableau 24 : Sorties du modèle : valeurs agrégées de la consommation d'eau totale, volume consommé par ha et volume consommé par ha irrigué, par classe de production et par type d'année.....	68
Tableau 25 : Sorties du modèle : valeurs agrégées de la consommation d'azote totale, par classe de production et par type d'année	69
Tableau 26 : Sorties du modèle : valeurs agrégées de la lixiviation totale et lixiviation par unité de superficie, par classe de production et par type d'année	69
Tableau 27 : Sorties du modèle : valeurs agrégées du stock d'azote total et du stock par unité de superficie, par classe de production et par type d'année	70
Tableau 28 : Sorties du modèle : valeurs agrégées de la marge totale et marge par unité de superficie, par classe de production et par type d'année	70
Tableau 29 : Doses d'irrigation et de fertilisation appliquées, rendements obtenus, lixiviation et stock d'azote résultant des itinéraires techniques appliqués par les agriculteurs et ceux obtenus après les résultats déterminés par l'établissement des courbes de réponse en utilisant CropSyst pour les cultures du maïs grain et maïs semence.....	82
Tableau 30 : Calendrier d'irrigation établi en utilisant CropSyst pour chaque culture, par type de sol et d'année climatique.....	83
Tableau 31 : Résultats du calage du modèle de programmation linéaire : comparaison entre les superficies réelles de chaque culture (en ha) et les superficies proposées par le modèle	94
Tableau 32 : Superficie occupée actuellement et marge procurée par les cultures considérées dans une possible répartition de la surface	95
Tableau 33 :Superficie occupée et marge procurée par les cultures considérées après optimisation par zone de la répartition de la surface disponible.....	96
Tableau 34 : Superficie occupée et marge procurée par les cultures considérées après optimisation régionale de la répartition de la surface disponible	96

Graphiques

Graphique 1: Températures moyennes et précipitations mensuelles pour l'année 2002 et moyenne trentenaire 1971-2001, station météorologique de Montauban	28
Graphique 2: Produit brut moyen par exploitation (F) dans chacune des 5 zones agricoles du bassin (zones 1, 2, 3, 4 et 5 définies dans le tableau 1).....	29
Graphique 3 : Produit brut moyen par ha (F/ha) dans chacune des 5 zones agricoles du bassin (zones 1, 2, 3, 4 et 5 définies dans le tableau 1).....	30
Graphique 4 : Distribution des classes de production par zone – pourcentage de sa superficie par rapport à la superficie totale de la zone.....	46
Graphique 5: Corrélation entre rendements observés et ceux simulés par CropSyst pour les trois types d'année considérées : humide (5a), moyenne (5b) et sèche (5c).....	56
Graphique 6 : Valeurs des rendements (kg/ha) et lixiviation de nitrates (kgN/ha) résultat des simulations avec CropSyst pour le maïs semence, pour chaque type de sol et chaque type d'année	58
Graphique 7 : Valeurs des rendements (kg/ha) et lixiviation de nitrates (kgN/ha) résultat des simulations avec CropSyst pour le maïs grain, pour chaque type de sol et chaque type d'année.....	58
Graphique 8 : Représentation de la corrélation entre les superficies de chaque culture au niveau du bassin résultant du modèle Olympe et celles observées dans la réalité, à partir des enquêtes (déclarations d'assolement 2000).....	62
Graphique 9 : Comparaison entre les superficies occupées par chaque culture (ha) montrées par les enquêtes (déclarations d'assolement 2000) et par le modèle agrégé Olympe, par zone :	63

Graphique 10 : Comparaison entre les superficies occupées par chaque culture (ha) d'après les déclarations d'assolement et d'après le modèle agrégé Olympe par classes de production : nous montrons comme exemples les classes 3 (vaches allaitantes), 11 (polyculture) et 1 (vaches laitières).	65
Graphique 11 : Exemple de courbes de réponse du blé conduit en pluviale à la fertilisation : (a) rendement (kg/ha) et (b) lixiviation (kg N /ha) obtenus sur le terrefort et dans une année humide.	78
Graphique 12 : Courbes de réponse du maïs grain à la fertilisation : (a) rendements (kg/ha) et (b) lixiviation des nitrates (kg N /ha) obtenus sur un sol de type terrefort et pour une année sèche. Pour chaque dose d'azote, le modèle calcule une dose d'irrigation en se basant sur le calcul du bilan hydrique.	79
Graphique 13: Courbes de réponse du maïs semence à la fertilisation : (a) rendements (kg/ha) et lixiviation (kgN /ha) obtenus sur un sol de type boulbènes et pour une année moyenne. Pour chaque dose d'azote, le modèle calcule une dose d'irrigation en se basant sur le calcul du bilan hydrique.	80
Graphique 14 : Comparaison du volume d'eau consommée au niveau des zones dans la situation actuelle avec celui résultant des itinéraires proposés par CropSyst, par type d'année.	84
Graphique 15: Comparaison des quantités d'azote appliquées au niveau des zones dans la situation actuelle avec celles établies par CropSyst pour chaque type d'année.	85
Graphique 16 : Comparaison des quantités d'azote lixiviées au niveau des zones dans la situation actuelle avec celles en appliquant les itinéraires techniques « optimaux » établis par CropSyst, pour chaque type d'année.	86
Graphique 17 : Comparaison des quantités d'azote lixiviées au niveau des zones dans la situation actuelle avec celles en appliquant les itinéraires techniques « optimaux » établis par CropSyst, pour chaque type d'année.	88
Graphique 18 : Comparaison entre les marges obtenues au niveau des zones dans la situation actuelle et avec les itinéraires proposés comme « optimaux » par CropSyst, dans les trois types d'année.	89
Graphique 19 : Résultats du calage du modèle de programmation linéaire : corrélation entre les valeurs réelles de superficies de chaque culture dans chaque zone et les valeurs obtenues à partir du modèle.	94
Graphique 20 : Comparaison entre la consommation totale d'eau par les cultures optimisées au niveau du bassin dans la situation actuelle, après l'optimisation par zone et après l'optimisation régionale, pour les trois types d'année climatique possibles	97
Graphique 21 : Comparaison entre la lixiviation totale des nitrates au niveau du bassin dans la situation actuelle, après l'optimisation par zone et après l'optimisation régionale, pour les trois types d'année climatique possibles.	97
Graphique 22 : Comparaison entre la marge totale (marge combinée, qui prend en compte la marge pour chaque type d'année climatique et la probabilité d'apparition de celle-ci) au niveau du bassin associée aux cultures considérées dans l'optimisation dans la situation actuelle, après l'optimisation par zone et après l'optimisation régionale	98
Graphique 23 : Consommation d'eau et lixiviation de nitrate par zone pour chaque type d'année climatique : comparaison entre les valeurs actuelles et celles résultant de l'optimisation par zone et de l'optimisation au niveau régional.	99
Graphique 24 : Comparaison par zone de la marge procurée par les cultures considérées dans le procès d'optimisation dans la situation actuelle, avec l'optimisation par zone et avec l'optimisation régionale	100

Introduction

L'augmentation de la population mondiale et le développement des nouveaux usages de l'eau sont à l'origine de l'apparition des tensions entre acteurs impliqués dans l'usage de la ressource. Ces tensions sont liées aux restrictions dans sa disponibilité, mais aussi à la diminution de sa qualité. Une des activités les plus déterminantes dans la problématique de l'eau est l'agriculture, qui joue un rôle fondamental à cause (I) du volume d'eau qu'elle consomme, (II) de sa contribution à la détérioration de la qualité de la ressource à travers la lixiviation de nitrates et de produits phytosanitaires. Ainsi, les nitrates, dont l'utilisation est toujours en progression, constituent aujourd'hui la première source de pollution des eaux. Il s'agit d'un type de pollution diffuse, où les facteurs sont difficilement identifiables en raison de l'existence des aléas et des différents facteurs interdépendants (facteurs climatologiques, agrologiques, agronomiques) qui interviennent dans la production de la pollution.

En France, un grand nombre de cours d'eau est touché par la pollution des nitrates. Depuis une vingtaine d'années, d'importants investissements ont été réalisés pour améliorer la qualité des eaux. Nous avons pu observer une diminution de la pollution d'origine industrielle et un avancement dans les systèmes d'épuration, mais dans le domaine agricole, cette pollution continue d'être préoccupante.

La politique de l'eau possède en France des formes multiples d'interventions menées par différents acteurs ; la concertation usagers-élus est la clé de voûte du dispositif de gestion de l'eau. Les services d'exploitation et d'assainissement relèvent de structures décentralisées, seule la police de l'eau demeure une prérogative de l'Etat. La loi de 1992 a conforté cette orientation avec la création d'outils de planification de l'eau au niveau de chaque grand bassin hydrographique.

Au niveau européen, la directive des nitrates 91/676/CEE du 12 décembre 1991 constitue le principal instrument réglementaire pour la lutte contre la pollution azotée d'origine agricole ; elle conduit à la délimitation des zones vulnérables, celles où les cours d'eau présentent une teneur en azote supérieure ou égale à 50mg/l, ainsi qu'à la définition des programmes d'action dans ces zones.

En France, nous trouvons deux textes fondamentaux : la loi du 16 décembre 1964, qui constitue la base du système français, avec la définition des six bassins hydrographiques, ses comités de bassin et les Agences de bassin, qui ont pour but d'assurer une gestion équilibrée de la ressource ; et la loi de 1992, qui considère l'eau comme patrimoine commun et prend en compte l'environnement comme un acteur. Cette loi comprend l'élaboration de SDAGE (Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des Eaux) à l'échelle de bassin et de SAGE (Schémas Directeurs de Gestion des Eaux) à l'échelle de sous-bassin. La gestion de la ressource, dans ce contexte légal, présente trois caractéristiques importantes : (I) une gestion locale intégrée à travers des structures de concertation entre les acteurs concernés, (II) une autonomie organisationnelle et (III) une autonomie financière des services de l'eau.

Les particularités de l'eau en tant que bien commun¹, ayant des usages divers par un grand nombre d'acteurs, rendent sa gestion complexe. Seule une gestion multi-acteurs, avec plusieurs formes de régulation semble possible. Si nous considérons la négociation comme la forme de résolution des conflits la plus convenable dans le cas d'un bien commun comme l'eau, le rôle de l'expert serait d'intervenir comme médiateur dans ces négociations pour offrir des réponses scientifiques aux demandes de conseil, et offrir des outils pour la prise de décisions. Il va comprendre la situation, la modéliser et rendre compte de sa complexité pour faire évoluer le débat.

Le cas du bassin versant Aveyron-Lère constitue un exemple de conflit d'usage de la ressource eau. En effet, une série d'acteurs essayent de trouver une solution pour l'allocation de la ressource eau et le maintien de sa qualité. L'agriculture joue ici un rôle important car elle consomme une très grande quantité

¹ Puech et Boisson (1995) définissent un bien commun comme celui qui n'a pas de propriétaire et donc de gestionnaire directement désigné

d'eau, et détériore la qualité de celle-ci en raison de la lixiviation des nitrates. Des équipes de recherche de l'INRA et du Cemagref, ont décidé d'intervenir dans le cadre du projet « AQUAE » (Action Scientifique Structurante), qui a comme but de « contribuer à l'amélioration des techniques et à l'élaboration de modes de gestion des systèmes agricoles, forestiers et hydrologiques pour valoriser la ressource en eau et préserver les systèmes aquatiques » (appel à intention dans Action Scientifique Structurante INRA-Cemagref, fév 1999)

Le présent travail s'inscrit dans le cadre décrit ci-dessus. A travers l'élaboration d'un modèle du fonctionnement du bassin, nous avons essayé d'évaluer à différents niveaux d'agrégation les consommations d'eau et l'impact environnemental des pratiques culturales actuelles et futures pour faciliter les négociations entre les acteurs impliqués dans le problème de l'allocation de l'eau et de la contamination azotée dans le bassin versant Aveyron-Lère. Pour construire un cadre de négociation autour du choix des techniques en rapport avec la consommation d'eau et l'utilisation de l'azote il est nécessaire d'évaluer l'impact des alternatives possibles et de rechercher des solutions négociables. Ces alternatives possibles sont élaborées au moyen de modèles de représentation du fonctionnement des exploitations et des cultures, c'est-à-dire, la construction de modèles bio-économiques. A partir des différentes simulations, on peut définir non pas une solution de planification mais un cadre de négociation entre les différents acteurs.

Dans une première partie, nous présenterons la problématique dans laquelle s'inscrit ce travail, ainsi qu'une description de la zone étudiée. Notre objectif est de :

- ◆ créer un modèle de fonctionnement agricole du bassin permettant d'évaluer à différents niveaux d'agrégation les consommations en eau et les pertes en nitrates,
- ◆ simuler des solutions pour aider à l'évolution de la région.

Dans une seconde partie, nous développerons les approches utilisées et notre méthodologie. Notre travail s'est décomposé en trois grandes phases :

1. Création d'une base de données. Cette approche est basée sur un modèle agronomique, nous permettant ainsi de déterminer l'impact des techniques d'irrigation et de fertilisation azotée par type de sol et d'année climatique sur : les rendements des cultures, la consommation d'eau et la lixiviation des nitrates.
2. Agrégation en utilisant un modèle agro-économique et via une typologie établie au préalable, des résultats obtenus à l'échelle des parcelles à celles des exploitations, classes et zones.
3. Elaboration de scénarios et simulations. Nous avons testé, en utilisant le modèle bio-économique et la programmation linéaire, des solutions (techniques et agronomiques) capables de réduire la consommation d'eau et la lixiviation des nitrates au niveau régional.

Partie I

Contexte du travail et présentation de la zone d'étude

Partie I.

Cadre du travail et présentation de la zone d'étude

Chapitre 1. La gestion de l'eau

I - Le problème de la gestion quantitative de la ressource

Bien que les besoins globaux en eau soient encore couverts par les ressources disponibles du point de vue quantitatif, l'augmentation de la population mondiale et le développement des nouveaux usages de la ressource sont à l'origine des tensions entre les différents acteurs, qui rendent nécessaire la gestion d'une ressource autrefois considérée comme libre². Ces tensions peuvent se manifester dans l'espace (disponibilité insuffisante de la ressource en eau dans certaines zones par rapport au développement localisé des besoins) ou bien dans le temps (à l'occasion des circonstances exceptionnelles dues aux aléas climatiques ou à l'irrégularité de la demande) (Boisson et Puech, 1995).

La qualité de l'eau est aussi un problème en expansion ; l'eau superficielle devient plus polluée surtout dans les pays développés, l'agriculture étant une des activités qui contribuent le plus à sa pollution par le lessivage des nitrates et de produits phytosanitaires. Dans les régions méditerranéennes, ces tensions sur l'usage de l'eau sont plus accentuées à cause des particularités du milieu :

- ♦ d'un point de vue climatique, ces zones sont caractérisées par une très forte saisonnalité du régime des précipitations et une très grande amplitude des variations de ces précipitations ;
- ♦ d'un point de vue géomorphologique, on trouve des reliefs le long des côtes, avec une plaine littorale rarement très large et de petits cours d'eau qui ne peuvent pas assurer une alimentation régulière en eau de surface ;
- ♦ d'un point de vue socio-économique, les zones méditerranéennes se caractérisent par une concentration des hommes sur le littoral, surtout en été.

L'apparition des tensions croissantes entre les divers usages de la ressource a conduit à une évolution des modes de gestion vers des modalités qui doivent prendre en compte l'interrelation entre ces usages, ainsi que la dimension inter temporelle de la ressource. La difficulté dans la détermination des acteurs chargés de gérer la ressource soulève le problème de l'application de la notion de *patrimoine* aux ressources naturelles : dans ce cas, il n'y a pas d'appropriation claire, il s'agit de biens communs à une communauté.

Seule est possible une gestion multi-acteurs où nous utilisons simultanément plusieurs formes de régulation (négociations, incitations, recherche de consensus). Face à tous ces conflits (i) d'allocation et de préservation de la qualité des hydrosystèmes, (ii) de coordination des pratiques et de financement des infrastructures, nous assistons à des transformations importantes des politiques de gestion de l'eau.

²D'après Boisson et Puech, 1995, jusqu'à une période relativement récente, les utilisations de l'eau comme ressource, tant à des fins domestiques (eau potable) que productives (irrigation, industrie) apparaissaient comme relativement libres et peu contraintes par rapport à l'ensemble de la ressource : elles en mobilisaient moins de 15% en moyenne pour l'Europe. Seuls quelques problèmes sporadiques et localisés de manque d'eau (sécheresse conjoncturelle) pouvaient apparaître... L'eau - milieu, dans la mesure où elle faisait l'objet de gestion, était gérée de manière accessoire et pourrait-on dire résiduelle.

II - La gestion qualitative de la ressource

1. La pollution par les nitrates

L'azote est un intrant dont l'utilisation montre une forte progression, car c'est un des facteurs les plus importants dans la croissance et le développement des plantes. Mais la quantité de cet intrant produit par le cycle naturel de l'azote est trop faible et irrégulière pour couvrir les besoins des cultures intensives, ce qui explique l'emploi de la fertilisation azotée. Cependant, si les apports d'engrais ou de fertilisants organiques sont supérieurs aux besoins des plantes, les nitrates ne sont pas retenus par le sol, car ils présentent une haute solubilité, ils sont donc sujets de ruissellement vers les eaux superficielles ou de drainage vers les nappes. De cette façon, les nitrates constituent actuellement la première source de pollution des eaux.

Le problème de la pollution azotée est lié aux changements de l'environnement économique et aux innovations qui ont eu lieu dans le secteur agricole pendant les derniers quarante ans. La Politique Agricole Commune, avec ses prix garantis, et le fort progrès technologique, avec la création des variétés à haut rendement mais plus exigeantes en engrais, le comportement des agriculteurs face au risque et le faible coût des engrais expliquent dans l'ensemble la situation actuelle de pollution des eaux et des sols.

Une caractéristique importante de ce phénomène est que la pollution par les nitrates d'origine agricole est à caractère diffus, c'est-à-dire que les auteurs ne sont pas facilement identifiables. En effet, il est souvent impossible d'imputer précisément les pollutions constatées à des exploitations agricoles bien définies parce qu'il y a des aléas et des facteurs interdépendants intervenant dans le processus de production de la pollution (Mahjoubi, 2002) :

- Facteurs climatologiques, principalement précipitations, température et évapotranspiration, qui conditionnent la mobilité des nitrates en modifiant le stock d'eau dans le sol, les conditions de drainage et l'activité microbienne.
- Facteurs agrologiques : propriétés physico-chimiques, hydromorphologiques et microbiologiques des sols qui déterminent l'évolution des nitrates et les conditions de perméabilité et minéralisation.
- Facteurs agronomiques : type de culture, travaux culturaux, niveau de fertilisation, couverture végétale et profondeur d'enracinement.

On se retrouve en plus avec l'incertitude dans la connaissance des processus, spécialement pour les délais de transfert ; une pollution observée aujourd'hui peut être la conséquence des actions datant de plusieurs années, et une politique engagée aujourd'hui ne sera ressentie qu'à long terme. Dans la lutte contre la pollution azotée, on peut trouver deux types de stratégies (Bel F. et al, 1999) :

- Des stratégies d'adaptation, basées sur l'emploi des solutions palliatives, qui visent à arriver à un niveau optimum de pollution accepté socialement sans diminution du revenu de l'agriculteur. Les coûts retombent ici sur le consommateur (exemple : l'agriculture bio)
- Des stratégies de précaution, qui visent l'efficacité de long terme en utilisant des solutions qui cherchent l'évolution des systèmes techniques pour parvenir aux niveaux de pollution acceptables avec diminution des risques. En général, ces solutions impliquent une extensification ou un changement dans le système de culture, et les coûts retombent sur le producteur.

Le choix de la stratégie à suivre va dépendre de deux facteurs fondamentaux : le délai fixé pour l'action (horizon d'efficacité) et le degré de pollution au moment de la mise en place des mesures correspondantes.

En France, alors que depuis une vingtaine d'années des investissements considérables préventifs et curatifs ont été réalisés par les Agences de l'eau pour réduire ces pollutions, un nombre croissant de cours

d'eau est touché par l'eutrophisation³ et la qualité des eaux souterraines est amoindrie par les pollutions diffuses. D'après le rapport de l'Institut français de l'environnement 2002 (Source : Institut Français de l'Environnement . http://www.ifen.fr/presse/dossier_ree2002.htm) de nouveaux progrès dans le domaine de l'épuration de l'eau ont été constatés ; aujourd'hui les effluents de 95% de la population métropolitaine sont dirigés vers un traitement d'épuration, avec des rendements épuratoires de plus en plus performants dans les stations publiques. Sur une longue période, les rejets industriels dans l'eau ont diminué de 3,6% par an pour les matières organiques, de 6,2% par an pour les matières inhibitrices et de 4,3% pour les matières en suspension entre 1980 et 1997. Mais dans le domaine agricole, malgré une diminution des engrais et des pesticides, l'agriculture continue à avoir des impacts préoccupants sur la qualité de l'eau, la diversité des paysages et le patrimoine naturel. Près de 30 % des eaux superficielles ont encore aujourd'hui une mauvaise ou très mauvaise qualité due à leur teneur excessive en nitrates et 20 % de la population française consomme une eau de boisson dont les quantités de pesticides excèdent les normes souhaitables.

La Cour Européenne de Justice a déjà condamné la France en 2001 pour la mauvaise qualité des eaux superficielles destinées à la production d'eau alimentaire, qualité en contradiction avec la directive européenne 75/440/CEE, et de nouveau en 2002 pour son manquement à la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles ; le dépassement de la limite de 50 mg/l de nitrates était contraire aux exigences de la directive 91/676/CEE.

2. Contexte législatif

La politique de l'eau se décline sous la forme de multiples interventions menées par des acteurs très différents. Ces acteurs ne se limitent pas aux pouvoirs publics déclinés aux niveaux national, régional ou local puisque les différentes structures de concertation, de décision font une place aux associations de défense des consommateurs, tandis que les entreprises privées ont aussi un poids important dans la gestion de cette ressource naturelle. Néanmoins, la multiplicité des intervenants dans ce domaine ne facilite pas toujours une bonne cohérence de l'ensemble du dispositif, en raison d'instruments de coordination insuffisants (Source : *La Documentation Française*). La politique de l'eau se décide aussi au niveau européen et la récente directive européenne de 2000 définit un cadre général qui ne se limite plus seulement à la lutte contre les pollutions mais organise la gestion de ce secteur en s'inspirant largement de ce qui a été fait depuis plusieurs décennies en France.

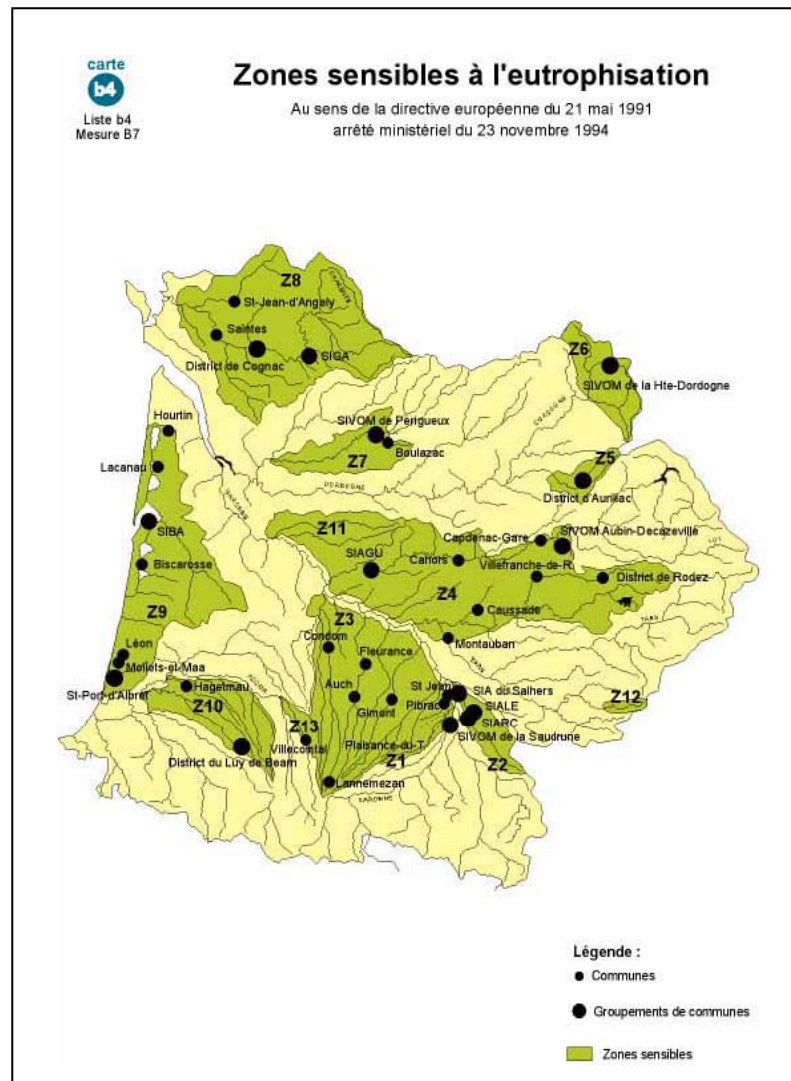
La politique de l'eau en Europe

L'Union Européenne s'est intéressée depuis les années 70 au domaine de l'eau, focalisant son approche sur la protection des eaux utilisées par l'homme. La directive européenne 91/676/CEE du 12 décembre 1991 constitue le principal instrument réglementaire au niveau européen pour lutter contre les pollutions liées à l'azote d'origine agricole. Elle concerne l'azote toutes origines confondues (engrais chimiques, effluents d'élevage, effluents agroalimentaires, boues...) et toutes les eaux quelque soient leur origine et leur usage. L'application nationale de cette directive a débuté en 1994 et comprend plusieurs volets (source: <http://www.environnement.gouv.fr/>) :

1. La délimitation de zones vulnérables dans les secteurs où les eaux présentent une teneur en nitrates approchant ou dépassant le seuil de 50 mg/l et/ou ont tendance à l'eutrophisation (prolifération des algues). La délimitation actuelle (mai 2000) en France métropolitaine concerne 74 départements. Elle s'appuie sur les observations de la campagne de surveillance de la qualité des eaux souterraines et superficielles (1997-98) qui a confirmé la poursuite de la dégradation de la qualité dans les secteurs pollués. (Voir Figure 1)

³ Eutrophisation = n. fém. (gr. *eu* bon et *trophê* « nourriture »). Processus évolutif des fonds de lacs thermiquement stratifiés où, faute d'une réoxygénation des eaux, les bactéries anaérobies se substituent aux aérobies dans la dégradation de la matière organique. L'eutrophisation est accélérée par les phosphates apportés par l'activité humaine, qui augmentent la biomasse des lacs. (Source : Hachette multimedia)

Figure 1 : Zones sensibles à l'eutrophisation en France, d'après la directive européenne du 21 mai 1991



Source : <http://www.eau-adour-garonne.fr/sdage>

2. La définition de programmes d'action dans les zones vulnérables s'appliquant à tous les agriculteurs de cette zone. Si le 1er programme (1997-2000) visait à corriger les pratiques les plus polluantes, le deuxième (2001-2003) doit permettre l'évolution de ces pratiques afin de protéger, voire de restaurer la qualité des eaux. Des objectifs quantifiés de gestion des fertilisants azotés et de couverture des sols sont fixés localement.
3. Un code national des bonnes pratiques agricoles d'application volontaire en dehors des zones vulnérables.

Une évaluation locale et nationale de la mise en œuvre de la directive est prévue en 2004.

III - Textes légaux pour la gestion de la ressource eau

1. Principales lois pour la gestion de l'eau

En France, depuis la création des agences de l'eau, des progrès importants ont été atteints dans la maîtrise des pollutions d'origine industrielle et domestique, mais la pollution agricole, en particulier la pollution diffuse azotée, continue de progresser, spécialement dans le nord-ouest du pays. Bien que les redevances

payées par les consommateurs augmentent, le nombre de points de prélèvement d'eau potable qui dépassent la norme européenne est aussi en augmentation. Cette situation a ouvert un débat sur l'efficacité des agences de l'eau, qui ne suivent dans leur fonctionnement qu'une logique de financement des dépenses pour la gestion de l'eau, sans essayer d'orienter les comportements dans un sens plus respectueux de l'environnement (Nocentini, 2001)

La législation française actuelle fait appel à des principes assez nouveaux tels que celui de *pollueur-payeur*, de *précaution*, de *participation* et de *décentralisation*⁴. Deux textes fondamentaux mettent en place un certain nombre d'institutions, qui sont le lieu de négociation, de confrontation des acteurs liés à la ressource en eau en vue de sa gestion intégrée :

- **Loi du 16 décembre 1964.** Elle constitue le fondement du système français de gestion de l'eau. Dans le but d'assurer une meilleure répartition et de lutter contre la pollution, la loi prévoit la définition des six bassins hydrographiques, avec ses comités de bassin et les Agences de bassin (après Agences de l'eau), dont le rôle est d'assurer la gestion équilibrée de la ressource. Les agences du bassin auraient trois formes d'intervention : action économique, financière et technique. L'action économique comprend des mécanismes pour obtenir la décentralisation de la gestion de ressources, comme l'établissement des redevances. L'action financière suppose l'établissement de systèmes d'aides versées par l'agence : subventions et prêts attribués pour travaux d'intérêt commun au bassin et qui réduisent les charges financières de l'agence.
- **Loi de 1992.** Elle a été créée en réponse aux changements du contexte législatif avec l'apparition des nouvelles approches de l'environnement, qui ont rendu nécessaire une réforme de la loi de 1964. Cette loi considère l'eau et les milieux aquatiques comme « patrimoine commun à tous », dont la protection, la mise en valeur et le développement dans le respect des équilibres naturels sont d'intérêt général. A l'échelle des bassins versants sont élaborés des SDAGE (Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux) et au niveau de sous-bassins peuvent être mis en place des SAGE. L'originalité de la loi de 1992 est de prendre en compte l'environnement comme un acteur en part entière ; elle définit la gestion équilibrée de l'eau et donne comme trois premiers critères :
 - ❑ la préservation des écosystèmes aquatiques, des sites et des zones humides,
 - ❑ la protection contre la pollution et la restauration de la qualité des eaux superficielles, souterraines et de la mer dans la limite des eaux territoriales,
 - ❑ le développement et la protection de la ressource en eau.

La gestion de la ressource eau présente, dans ce contexte légal, trois caractéristiques importantes :

⁴ Il s'agit des quatre principes fondamentaux du Code de l'Environnement qui servent comme base dans la construction de la Charte de l'Environnement par le Ministère de l'Ecologie et du Développement Durable (Charte de l'environnement : <http://www.charte.environnement.gouv.fr/index.php>). Ces principes sont les suivants :

- Principe du pollueur-payeur : dans le but de limiter les atteintes à l'environnement, le principe pollueur-payeur tend à imputer au pollueur les dépenses relatives à la prévention ou à la réduction des pollutions dont il pourrait être l'auteur. L'application de ce principe vise à anticiper un dommage et à fixer une règle d'imputation du coût des mesures en faveur de l'environnement.

- Principe de précaution : il vise à prendre des mesures en cas d'incertitude scientifique sur les conséquences des risques pour l'environnement.

- Principe de participation : l'information, la consultation et la participation du public en matière environnementale constituent une démarche essentielle pour la prise de décision publique dès son élaboration, sa conception, sa mise en oeuvre puis son évaluation. Il s'agit également d'un élément important pour responsabiliser les agents économiques et les citoyens aux impacts de leurs comportements et pour les informer des risques ou nuisances auxquels ils peuvent potentiellement être exposés.

- Principe de décentralisation : le renforcement des organisations de la société civile, clés de la construction démocratique et de l'intégration régionale est essentiel pour réussir à avoir un développement durable

- Gestion locale, à travers des structures de concertation entre les acteurs concernés. Les lois de 1964 et 1992 mettent en place des instances de gestion décentralisée de l'eau (Agences de l'eau, SAGE, contrats de rivière) qui font des collectivités territoriales les principaux gestionnaires de la ressource.
- Autonomie organisationnelle et financière des services de l'eau. Les Agences de l'eau sont indépendantes financièrement, leur budget étant constitué essentiellement à partir des redevances, qui sont après reversées sous forme de prêts ou des subventions à des chantiers visant à une meilleure gestion de la ressource.
- Gestion intégrée, justifiée par les externalités des diverses activités liées à la ressource. Elle se base sur des outils réglementaires qui ont pour but d'organiser la confrontation entre acteurs.

Deux autres outils ont été mis en place pour gérer la ressource à une échelle adaptée :

▪ **Le contrat de milieux**

Institué par le Ministère de l'Environnement en 1981, il constitue un programme opérationnel sur 5 ans, négocié localement et signé entre les partenaires concernés, accordant des actions destinées à restaurer et valoriser un milieu donné (rivière, lac, baie, nappe). La spécificité du contrat de rivière est qu'il doit partir d'une mobilisation des élus locaux, des riverains et des usagers en faveur de la réhabilitation et de la valorisation de leur patrimoine aquatique. La différence principale avec le SAGE est que celui-ci revêt une dimension juridique et vise à encadrer la concertation, alors que le Contrat de rivière revêt une dimension opérationnelle et vise à aider à la concertation.

▪ **Le PGE (Plan de Gestion des Etiages)**

Il s'agit d'un protocole contractuel spécifique à Adour et Garonne. Le SDAGE du bassin versant recommande son établissement dans l'objectif d'équilibrer la ressource entre les différents usages et en prenant compte des besoins de l'écosystème. L'ensemble des acteurs et des usagers élabore de manière négociée des règles de gestion et des moyens de contrôle de la ressource et des usages.

2. Les outils d'intervention sur la gestion de l'eau en agriculture

Les outils de gestion de la demande sont des instruments visant à maîtriser la demande d'eau, de manière à ce qu'ils soient susceptibles de modifier celle-ci directement ou indirectement dans le but d'arriver à un équilibre offre/demande. Les outils d'intervention les plus utilisés sont énumérés ci-après :

a) Des outils non économiques

Parmi les instruments non économiques capables de gérer la demande, nous pouvons mentionner l'éducation, les règles qui déterminent les droits d'accès, d'usage et de participation à la gestion. Par exemple, les interdictions préfectorales. Il s'agit d'une interdiction de prélèvement imposée par le préfet ; cette méthode est utilisée généralement dans des situations de crise non maîtrisable par d'autres outils.

b) Des outils économiques (Chohin-Kuper et al, 2003)

Les outils économiques conduisent à une modification de la demande de manière indirecte ; ils cherchent à changer le comportement des usagers fondés sur les mécanismes de marché :

- La tarification de l'eau

Soutenue par les économistes, cette méthode est conçue pour orienter la consommation dans le sens de l'optimum économique collectif.

- La gestion volumétrique

Elle essaye de définir le volume optimal que chaque agriculteur doit prélever, en fonction des besoins des cultures et de la disponibilité d'eau dans le milieu naturel.

IV - Modes de coordination sociale pour la gestion des ressources. Place de l'expert dans le processus de négociation

1. Modes de coordination pour la résolution de conflits autour de la gestion de l'eau

La ressource eau présente la particularité d'être un bien commun, avec des usages variés et un grand nombre d'acteurs impliqués, ce qui rend sa gestion complexe. Cette gestion a été marquée en France par l'existence de négociations multiples et une forte asymétrie d'information des usagers et des représentations des usages. La détermination des acteurs chargés de gérer la ressource soulève le problème de l'application de la notion de *patrimoine* aux ressources naturelles : dans ce cas-là, il n'y a pas d'appropriation claire, il s'agit de biens communs à une communauté. Seule est possible une gestion multi-acteurs où on utilise simultanément plusieurs formes de régulation (négociations, incitations, recherche de consensus)

Dans le cadre de négociations pour la recherche des solutions à ce type de situations conflictuelles, on peut trouver différents modes de coordination des acteurs impliqués (Nocentini, 2001):

- La concertation : il s'agit d'une consultation des acteurs pour aider le décideur (généralement une autorité administrative ou politique) à mieux connaître leurs préférences.
- La négociation : il s'agit d'un processus où la décision est prise en commun sans un décideur central. Les différentes parties du conflit s'engagent volontairement pour établir une relation centrée sur une activité de répartition ou échange des ressources ou de résolution de problèmes qui les concernent eux-mêmes.
- La médiation patrimoniale : méthode qu'utilise la négociation comme principe de résolution du conflit mais fait intervenir un tiers extérieur, le médiateur. Le but est de faire émerger un objectif commun à long terme.

Dans le cas de l'eau, patrimoine commun, elle présente les caractéristiques d'être un bien collectif, dont le gestionnaire n'est pas le propriétaire. Le déficit dans la définition des droits sur la ressource commune a comme conséquence une mauvaise gestion des conflits, pour laquelle il faut la négociation entre usages et usagers. En plus, la gestion collective doit être basée sur le long terme. Ces considérations sont spécialement prises en compte dans la médiation patrimoniale, méthode utilisée de façon courante aux Etats-Unis, qui comporte trois phases :

1. Diagnostic de la situation conflictuelle et mise en place du groupe de négociation
2. Echanges de vues et d'informations et établissement de la liste des choix alternatifs envisageables
3. Conclusion de la médiation : proposition des solutions et structuration d'un plan de mise en œuvre

En France, les diverses lois ont mis en place des outils de gestion de la ressource qui ont fait appel à la négociation entre acteurs et à la concertation, mais la médiation a été à peine utilisée. Jusqu'à une époque récente, la démarche de la gestion de l'eau comportait une vision de court terme ; les SDAGE (Schémas Directeurs d'Aménagement et Gestion des Eaux) ont introduit la vision à moyen terme (10-20 ans), mais au niveau des acteurs locaux les outils de gestion offrent encore des perspectives plus courtes. Par rapport à la coordination des acteurs, la place du Gouvernement reste importante et va même s'accroître dans les Agences de l'Eau. On parle donc de gestion concertée de la ressource en partie décentralisée.

2. La place de l'expert dans les négociations : l'aide à la décision

Le rôle de l'expert est d'offrir une réponse scientifique à une demande de conseils, et d'offrir des outils pour l'action et l'aide à la décision. Le scientifique peut faciliter la prise de décision politique en permettant de choisir la meilleure solution. Les compétences du scientifique sont le plus souvent sollicitées dans une situation de conflit. Soit un groupe d'acteurs peut lui demander de faire un diagnostic pour un projet collectif, soit un seul acteur peut le solliciter pour l'aider à se positionner dans le conflit.

Enfin, il peut être sollicité par le décideur politique pour identifier les facteurs favorables une gestion durable. Généralement, le scientifique va chercher à comprendre la situation puis la modéliser et son rôle dans la négociation est de rendre compte de la complexité de la situation et de faire évoluer le débat. Il est important de faire valider les résultats et de prendre en compte les contraintes techniques et organisationnelles qui s'appliquent aux acteurs pour la mise en œuvre. Quand la prise de décision est faite par les pouvoirs publics, les apports des experts dans le processus sont limités. Dans ce cas-là, Douillet propose les notions d' « évaluation-accompagnement » (Douillet, 1998), qui n'est plus centrée sur la décision mais sur le processus d'échanges et de négociation entre acteurs, et de « médiation scientifique »

Face à la nécessité du décideur de faire un choix entre différentes possibilités d'action à un moment donné, l'aide à la décision apparaît comme un moyen de faciliter la compréhension du problème et la formulation des possibles solutions et ses conséquences. Roy (Roy, 2000) définit l'aide à la décision comme *« l'activité de celui qui, prenant appui sur des modèles clairement explicités mais non nécessairement complètement formalisés, aide à obtenir des éléments de réponse aux questions que se pose un acteur dans un processus de décision, éléments concourant à éclairer la décision et normalement à recommander, ou simplement à favoriser, un comportement de nature à accroître la cohérence entre l'évolution du processus d'une part, les objectifs et le système de valeurs au service desquels ces acteurs se trouvent placés d'autre part »* Pour Roy, nous ne pouvons pas ignorer l'interaction qui existe entre individu et réalité en les considérant séparément dans le procès de modélisation. Checkland et Scholes proposent une méthodologie (*Soft System Modeling*) avec émulation des acteurs impliqués dans un processus d'apprentissage qui est généralement sans fin. L'apprentissage prend place à travers un processus itératif d'utilisation de systèmes, de réflexion et de débat en prenant en compte le monde réel (Checkland et Scholes, 1993)

L'hypothèse la plus importante sur laquelle se basent les instruments d'aide à la décision est la rationalité supposée des acteurs (Le Bars, 2003). Il existe de nombreuses approches, mais nous ne retiendrons que les trois suivantes :

- Rationalité complète (Russel, 1999) :
 - Les objectifs du décideur sont clairement exprimés dès le départ et peuvent être rangés selon un ordre de préférence.
 - L'ensemble des solutions possibles dans une situation de décision précise est connu
 - Les conséquences attachées à chacune des solutions sont précisées.
 - Le choix de la solution s'effectue en retenant celle qui produit les conséquences préférées en tenant compte des objectifs préétablis.
- Rationalité limitée (Simon, 1947) :
 - Le décideur perçoit un problème auquel il réagit, en référence à sa perception de la réalité.
 - Le décideur doit d'abord identifier les actions possibles (sans toutefois les découvrir toutes).
 - Il doit recueillir l'information nécessaire pour déterminer et évaluer les conséquences des actions.
 - Les objectifs poursuivis par le décideur sont précisés tout au long du processus sous la forme de niveaux d'aspirations ou de buts minima.
 - Le décideur arrête son choix sur la première option analysée qui satisfait chacun des buts fixés.
- Rationalité adaptative (Cyert et March, 1963) :
 - L'adaptation de l'organisation à son environnement se fait principalement à partir des enseignements (réussites ou échecs) découlant des expériences antérieures.
 - L'organisation apprend à partir de ses réactions ou réponses de son environnement, réponses à partir desquelles elle réagit à son tour en modifiant ses règles de comportement.
 - Cet apprentissage intervient non seulement dans l'élaboration de règles spécifiques de décision mais dans le choix des buts à poursuivre et dans le développement de compétences particulières requises pour s'adapter à l'environnement.

3. Types d'outils pour l'aide à la décision

L'aide à la décision individuelle est passée, avant le développement de l'informatique, par une première étape basée sur des techniques de classement et comparaison entre les résultats des différentes exploitations d'un groupe homogène, méthode qui permettait déjà une interaction entre conseiller et agriculteur.

Dans cette première période, on commence aussi à développer un deuxième type de méthodes d'aide à la décision : l'optimisation à travers des techniques de programmation linéaire, d'abord sous la supposition de la rationalité pure du décideur, pour introduire après l'approche de rationalité limitée.

Enfin, le troisième type d'outils utilisés sont les simulateurs budgétaires, techniques qui contribuent à une amélioration du dialogue entre le conseiller et l'agriculteur en considérant la gestion stratégique pas comme la recherche d'un objectif, mais comme un processus d'apprentissage ; cette approche se rattache en grande partie au courant de la rationalité adaptative, et c'est ici où se situe le simulateur Olympe (Attonaty, 1994), simulateur que l'on utilisera dans notre approche et détaillera par la suite.

Le fonctionnement d'Olympe répond à la conception des Systèmes Interactifs d'Aide à la Décision (SIAD), définies par Keen et Morton comme « *un système ouvert qui augmente la qualité des processus de décision plutôt que leur productivité* » (Keen et Morton, 1978). Ces systèmes ne cherchent pas une solution optimale mais ils ont comme finalité d'« *amplifier le raisonnement du décideur sur la base de ses propres représentations* » (Courbon, 1993). Ils sont utilisés de préférence quand les problèmes sont mal structurés (Attonaty et al, 1999).

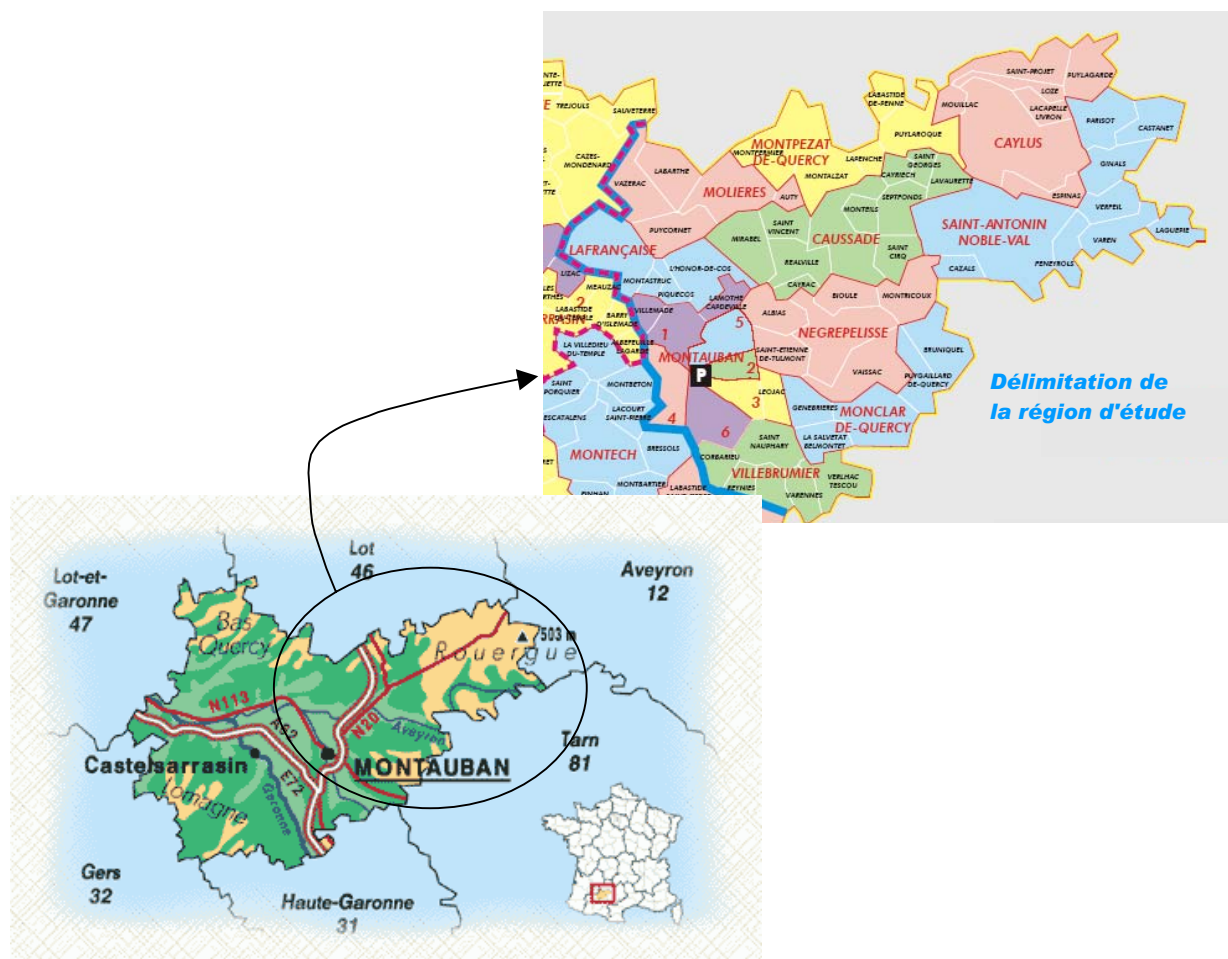
Les SIAD utilisent un cadre de représentation des connaissances qui permet de formaliser un modèle d'action sous forme de règles de décision, le formalisme du langage étant proche des représentations des acteurs et manipulables par des conseillers non spécialisés en modélisation (Le Bars, 2003). Les fonctionnalités du modèle Olympe vont plus loin : quand l'objectif est la recherche des solutions au niveau global, il permet de travailler à différents niveaux d'agrégation, il permet de simuler et d'évaluer les résultats d'un ensemble, il est susceptible d'être utilisé pour l'aide à la négociation d'un collectif. C'est dans ce type de contexte de négociation collective qu'on se retrouve dans le cas des négociations du bassin versant Aveyron-Lère, dans lequel on va utiliser Olympe.

Chapitre 2. Description de la zone d'étude

I - Situation géographique

Notre zone d'étude est le bassin versant Aveyron aval – Lère (Figure 2), qui se situe dans le département de Tarn et Garonne à 44° de latitude Nord, dans la région de Midi-Pyrénées. L'Aveyron à l'aval de Monttricoux présente un bassin versant de 390 km² et coule dans la vallée alluvionnaire pour rejoindre le Tarn à l'amont de Montauban, environ 38 km à l'aval de Monttricoux. La plaine traversée est l'hôte de cultures riches, largement irriguées. La Lère présente un bassin versant de 400 km², et se jette dans l'Aveyron à Réalville environ 40 km après sa source ; elle prend sa source dans les Causses du Quercy, plateaux calcaires, et coule ensuite sur les coteaux du Bas-Quercy de Montpezat, dans des domaines de polyculture avant de rejoindre la plaine alluviale de l'Aveyron.

Figure 2: Situation de la zone d'étude : territoire compris dans le contrat de rivière Aveyron aval – Lère



Source : préfecture de Tarn et Garonne ; <http://www.tarn-et-garonne.pref.gouv.fr>

II - Climat

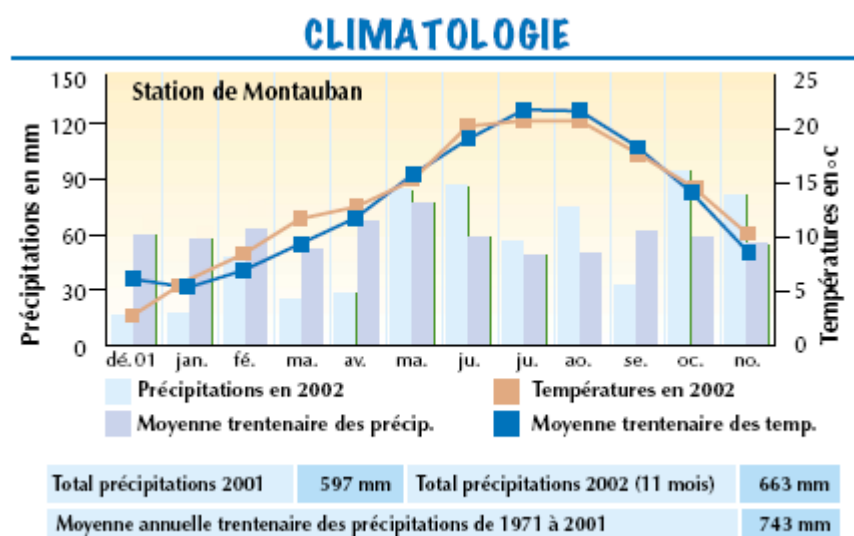
Au niveau du département, le type de climat est appelé « climat aquitain du secteur toulousain », c'est un climat sud-méditerranéen atténué par des tendances océaniques et continentales, ce qui engendre une

irrégularité des pluies et des températures. La température moyenne annuelle est de 12,5 à 12,9°C. La quasi-totalité de la région présente une période de sécheresse marquée en été, avec une moyenne annuelle de 700 à 800mm. Elle est caractérisée par trois tendances de vent : du sud-ouest, doux et humide, du nord-ouest, froid et du sud-ouest, chaud et sec.

Au niveau de Tarn et Garonne, le climat est qualifié de doux et tempéré, mais très variable (graphique 1) :

- précipitations : la moyenne annuelle est 650 mm, avec une pointe en mai, une période de sécheresse en été et pluviométrie irrégulière en automne. Nous constatons une variabilité importante d'une année sur l'autre.
- températures : l'amplitude thermique est faible ; l'hiver est doux, l'été chaud, parfois il y a des gelées en printemps.
- l'ensoleillement observé se situe entre 2000 et 2250 heures par an.

Graphique 1 : Températures moyennes et précipitations mensuelles pour l'année 2002 et moyenne trentenaire 1971-2001, station météorologique de Montauban



Source : Agreste 2002

Ces caractéristiques du climat, ajoutées à celles des sols, font que l'irrigation est très développée sur les exploitations agricoles du département et déterminent le choix des cultures.

III - Les régions naturelles

Son relief et la diversité des sols conduisent au découpage du département en 11 régions agricoles (Mahjoubi, 2002). Nous trouvons trois types de sols :

1. les sols d'alluvions quaternaires, profonds et perméables, faciles à travailler, avec une faible capacité de rétention d'eau, le long des rivières,
2. les sols argilo-calcaires du Quercy (Quercy Blanc et Vert), sur les coteaux. Ce sont des sols superficiels, sensibles à l'érosion,
3. les boubènes sur les anciennes terrasses de l'Aveyron. Il s'agit de terres très limoneuses, pauvres et mal structurées. Ces sols ont une faible capacité de rétention d'eau, ils sont imperméables, peu profonds et difficiles à travailler.

Le relief est peu accusé ; plaine et plateau sont trop plats pour faciliter l'écoulement, les pentes des coteaux du Quercy trop accentuées pour le travail du sol.

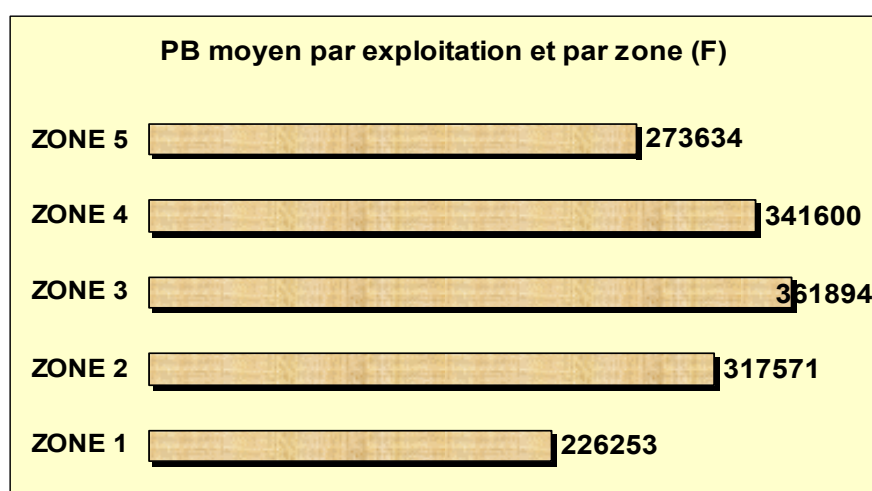
Par rapport aux régions agricoles du bassin versant, on a identifié 5 zones (causses calcaires, Quercy blanc, vallées de l'Aveyron et la Lère, zone des boubènes et Quercy vert : voir tableau 1) qui diffèrent fondamentalement selon le type de sol et le type de productions développées. Ses caractéristiques principales sont résumées dans le tableau suivant :

Tableau 1: Caractéristiques du sol, irrigation et cultures pratiquées dans les 5 régions agricoles qui composent le territoire du contrat de rivière Aveyron aval – Lère

Zones	Type de sol		Cap. rétention	Irrigation	Cultures
1. Causses calcaires (NE)	Sols du Causse	Calcaires, superficiels, plus ou moins argileux. Faible épaisseur et capacité de stockage	Faible	Cultures irriguées	Cultures fourragères et élevage
2. Quercy Blanc : lacs	Terrefort	Argileux, plus ou moins compacts et calcaires. Sensibles à l'érosion	50 mm	Lacs alimentés par eau de ruissellement ou des sources. Nombreuses retenues	Fruitiers et grandes cultures
3. Vallées de l'Aveyron et la Lère	Sols d'alluvions	Profonds, perméables, faciles à travailler mais faible capacité de rétention en eau	30 mm	La plus développée. Eau de surface ; pompages directs dans la rivière ou ASA	Productions semence, cultures fourragères et fruitières
4. Boubènes : rivières et grands lacs	Boubènes	Anciennes terrasses de l'Aveyron, limoneuses et structurées. Pauvres, imperméables, peu profonds, difficiles à travailler. Faible réserve utile.	40 mm	ASA pompant de l'Aveyron ou du Gouyre, Tordre et Ganiol	Grandes cultures
5. Quercy Vert : grands lacs	Terrefort	Sols comme zone 2 : argilo-calcaires, sur des coteaux.	Faible	Bien développée par ASA du Gouyre, Tordre et Ganiol et retenues collinaires	Grandes cultures et cult. fourragères

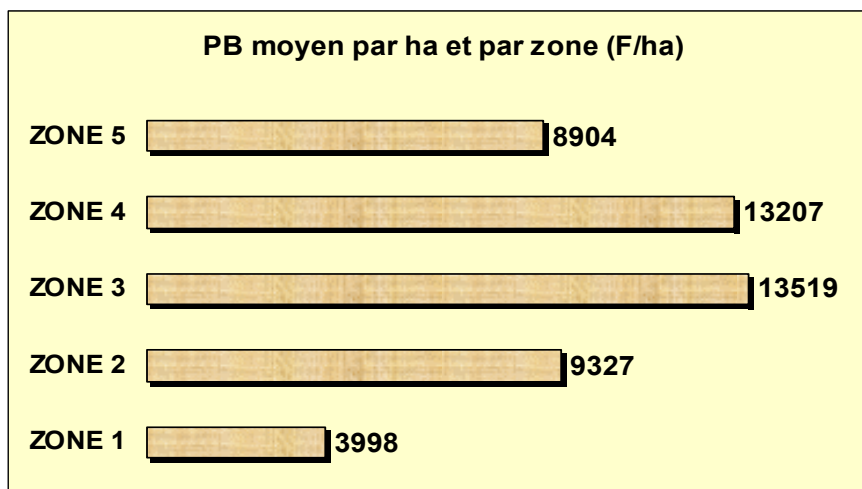
Comme on observe dans le tableau 1 ci-dessus, les caractéristiques particulières de chaque zone au niveau du type de sol, du relief et de la disponibilité d'eau d'irrigation conduisent à des différences en terme de cultures. Cette diversité des productions génère aussi des résultats économiques différents pour chaque région. Les graphes suivants (Graphiques 2 et 3) montrent le produit brut dégagé par zone en francs et en francs par unité de superficie, d'après les déclarations d'assolement (année 2000) Nous constatons une hétérogénéité, les zones 3 (zone d'alluvions) et 4 (boubènes) présentent le produit brut le plus important (même en valeur absolue qu'en valeur par ha):

Graphique 2: Produit brut moyen par exploitation (F) dans chacune des 5 zones agricoles du bassin (zones 1, 2, 3, 4 et 5 définies dans le tableau 1)



Source : déclarations d'assolement 2000

Graphique 3 : Produit brut moyen par ha (F/ha) dans chacune des 5 zones agricoles du bassin (zones 1, 2, 3, 4 et 5 définies dans le Tableau 1)



Source : Déclarations d'assolement 2000

IV - Contexte hydrologique

Au niveau des ressources en eau, on trouve trois aquifères sur le bassin versant, avec des volumes souvent mal connus :

- La nappe alluviale qui accompagne l'Aveyron et l'aval de la Lère. Les formations réservoirs sont constituées par des alluvions quaternaires. Son modèle hydrologique n'est pas connu, mais elle sert de ressource pour les prélèvements agricoles.
- La zone de Caussade et des coteaux à l'ouest de Caussade. Il existe des aquifères sous la molasse tertiaire et plus en profondeur, mais l'imperméabilité de cette molasse limite les écoulements de surface.
- Sur les plateaux calcaires karstiques dans les Causses du Quercy, dans la zone de Caylus. La nappe résulte des infiltrations dans un calcaire karstique fissuré, et elle est très vulnérable à la pollution à cause de la rapidité d'infiltration de l'eau dans le calcaire. Deux sources d'eau potable sont exploitées.

Le département est alimenté par trois cours d'eau principaux : la Garonne, le Tarn et l'Aveyron. Le niveau de teneur en nitrates n'est que passable dans la plupart du département, atteignant la pollution azotée des hauts niveaux dans certains tronçons. Une source importante de pollution est la station d'épuration de Caussade, dont les effets se font sentir sur l'Aveyron.

Les principaux usages de l'eau dans la région sont :

- L'agriculture. Les pompages peuvent être individuels en rivière, en puits ou à partir des retenues collinaires. Les besoins agricoles sont difficiles à apprécier en raison d'une connaissance imparfaite des surfaces et de l'absence des données sur les volumes consommés.
- Les usages domestiques. Pour l'alimentation en eau potable, l'eau est pompée dans la nappe et prélevée dans des sources. Il y a sur le bassin versant huit points de prélèvement principaux, situés essentiellement dans la vallée de l'Aveyron, ainsi qu'aux abords de Caussade et Puylaroque.

- Les usages industriels, plus marginaux, avec 5 établissements industriels qui effectuent des prélèvements sur le bassin de la Lère et 12 sur l'Aveyron. Elles ne constituent pas des quantités significatives sur l'ensemble des écoulements sur le bassin.
- Les loisirs : le département reçoit chaque année un grand nombre de touristes qui pratiquent des activités aquatiques (canoë), de pêcheurs.

Le tableau 2 montre les volumes de prélèvements (millions de m³) dans l'ensemble du bassin Aveyron-Lère et ses deux sous-bassins. D'après les chiffres montrés, on peut constater que l'agriculture est l'activité qui consomme la partie la plus importante, environ 80% du total de la ressource.

Tableau 2 : Bilan des prélèvements (millions de m³) sur le bassin versant du contrat de rivière

	Bassin de l'Aveyron	Bassin de la Lère	Bassin du contrat de rivière
Alimentation eau potable	2,078	1,529	3,607
Prélèvements industriels	1,413	0,136	1,549
Prélèvements agricoles	16,900	3,400	20,300
Total	20,391	5,065	25,426

Source : Etudes préalables au contrat de rivière Aveyron aval – Lère, Conseil Général de Tarn et Garonne

V - Activité agricole

Sur une population totale de 206 034 hab (INSEE, 1999) qui montre une tendance au vieillissement, 14 075 travaillent dans le secteur agricole d'après le recensement agricole réalisé par la Direction Départementale de l'Agriculture et de la Forêt (DDAF) dans l'année 2000.

La superficie moyenne des exploitations agricoles était de 30ha en 1997, évoluant vers une concentration, avec une diminution du nombre des exploitations et une augmentation de la taille. Quant aux activités développées, l'hétérogénéité des sols de la zone conduit à une variabilité des potentialités agricoles et une diversification des cultures : des céréales, des prairies, productions légumières de plein champ et fruitières, vignes et élevage. La tendance observée dans le département est une spécialisation dans les productions fruitières et céréalières (Tableau 3).

Tableau 3 : Utilisation du sol dans le département Tarn et Garonne

Campagne 2000-2001		Surface (ha)	% de la SAU
Terres labourables		176.840	78,0
dont	Céréales	83.200	36,7
	Oléagineux	32.700	14,4
	Prairies artificielles et temporaires	23.470	10,3
	Jachères	21.850	9,6
Cultures permanentes		49.960	22,0
dont	Vergers	13.350	5,9
	Vignes	4.870	2,1
Surface agricole utilisée		226.800	100
Surface département		373.115	-

Source : DDAF. Statistique agricole annuelle 2001

La surface irriguée sur le département est en augmentation régulière (Tableau 4). Elle représentait en 1997 35% de la SAU (surface agricole utile), avec une superficie moyenne irrigable par exploitation de 18,7 ha. Les surfaces irriguées sur ce périmètre (Tableau 5) se répartissent entre le maïs en production de semence et ensilage (très grand consommateur, qui représente à lui seul près de 2/3 des surfaces irriguées), le sorgho, le soja, le tournesol, les productions fruitières et légumières en plein champ (Rapport d'activité, contrat de rivière, 2000)

Tableau 4: Evolution des surfaces irriguées et irrigables du département Tarn et Garonne

Année	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997	1998	1999	2000
Surfaces irriguées primées par PAC (ha)				40.200	42.600	44.100	46.500	50.700	52.100	47.700	
Autres cultures probablement irriguées (ha)	19.950	21.940	22.400	22.100	20.950	19.500	19.150	18.500	18.350		
Total surface irriguée (ha)	45.300			50.250		61.900		58.400			58.000
Surface irrigable (ha)	64.750			79.400		82.300		80.100			79.000

Source : AGRESTE 1997, 1998 et 2000 ; Enquêtes de Structure 1990, 1993, 1995, 1997 ; et RGA 2000

Tableau 5: Superficies irrigables (ha) dans le département, Tarn et Garonne d'après les autorisations de prélèvement d'eau : superficies irriguées par chaque système d'irrigation et par chaque origine d'eau

Le type d'irrigation	2001	2002
Irrigation collective (ha)	23.500	23.000
Irrigation individuelle (ha)	44.200	43.500
Total (ha)	67.700	66.500

L'origine de l'eau	2001	2002
Cours d'eau (ha)	35.700	35.400
Eaux souterraines (ha)	11.000	10.700
Retenues collinaires (ha)	21.000	20.400

Source : DAF : MISE

VI - Gestion de l'eau dans le bassin versant Aveyron-Lère

Pour la gestion locale de l'eau, divers cadres de négociation sont possibles :

A. Le Plan de Gestion des Etiages (PGE)

Il s'agit d'une négociation qui essaie d'organiser la gestion quantitative de l'eau au niveau de l'ensemble de l'Aveyron. En amont, les usages dominants de la ressource sont touristiques et hydroélectriques ; en aval, l'irrigation devient beaucoup plus importante et le déficit en eau (qualitatif et quantitatif) se fait sentir. Les deux principaux enjeux de ce PGE sont d'équilibrer la ressource en eau entre les différents usages et vis-à-vis des besoins fondamentaux de l'écosystème aquatique et de garantir une solidarité à l'échelle du bassin. On devra établir d'abord les états de lieux, faire des simulations des différents scénarii qui vont faciliter les négociations pour la recherche de solutions et arriver finalement à la concertation et validation avec les usagers.

B. Le contrat de rivière Aveyron aval – Lère (voir annexe 1)

Signé le 31 mars 2000 entre la Préfecture du Tarn et Garonne, l'Agence de l'Eau Adour et Garonne et le Conseil Général du Tarn et Garonne, son programme d'action comporte une vingtaine de points organisés en 4 volets :

- entretien des berges des cours d'eau,
- dépollution (agricole, domestique et industrielle),
- hydraulique : coordination avec le PGE et étude d'un système d'annonce des crues,
- animation et sensibilisation des riverains.

Le contrat de rivière se confronte à deux politiques opposées : d'une part, il s'inscrit sur un territoire très agricole où l'irrigation a un rôle majeur, car elle permet de produire des cultures à forte valeur ajoutée soit dans une situation de contrats (semences), soit pour des raisons de sécurisation économique (vergers) ou

bien comme choix agronomique (ensilage et sorgho). D'autre part, des projets tournés vers le développement durable qui reposent sur la limitation des prélèvements agricoles et des impacts sur le milieu naturel sont en train d'être mis en place.

Moyens prévus par le contrat de rivière contre la pollution azotée

Dans le cadre de sa politique de protection de l'environnement, le Conseil Général assure un suivi régulier de la qualité des eaux de rivières et une assistance technique auprès des exploitants de stations d'épuration. Il s'est doté pour cela de deux services complémentaires : le Service d'Assistance Technique aux Exploitants des Stations d'Epuration (S.A.T.E.S.E. 82), qui réalise les prélèvements sur les cours d'eaux, et le Laboratoire Vétérinaire Départemental (agréé par le Ministère de l'Environnement types 1 et 2) qui réalise les analyses nécessaires sur ces prélèvements. Les résultats des analyses permettent notamment :

- une meilleure connaissance de l'état physico-chimique des cours d'eaux,
- la définition d'une politique de gestion des cours d'eaux.

Le Laboratoire Vétérinaire Départemental procède à ce titre à des analyses sur :

- ❑ les indicateurs globaux : D.C.O. (Demande Chimique en Oxygène), D.B.O. (Demande Biochimique en Oxygène) et M.E.S. (Matières en Suspension),
- ❑ la matière azotée (nitrates...),
- ❑ la matière phosphorée (phosphates...)
- ❑ d'autres paramètres

Au niveau départemental, l'arrêté 02-138 relatif au troisième programme d'action de la directive nitrates propose des mesures pour la lutte contre la pollution azotée d'origine agricole :

- Obligation d'établir un plan de fumure azotée prévisionnel et de remplir un cahier d'épandage de fertilisants azotés organiques et minéraux ;
- Pour les effluents d'élevage, obligation de respecter une valeur limite de quantité d'azote épandu, y compris par les animaux eux-mêmes ;
- Obligation d'épandre les fertilisants organiques et minéraux en se basant sur l'équilibre de la fertilisation azotée à la parcelle pour toutes les cultures ;
- Respect des périodes d'interdiction d'épandage des fertilisants azotés ;
- Respect des conditions particulières d'épandage des fertilisants azotés organiques et minéraux (distance d'épandage liée à la proximité des eaux de surface ; épandage des fertilisants type II et III sur des sols dont la pente est supérieure à 12% ;
- Obligation de disposer d'une capacité de stockage des effluents d'élevage, permettant de respecter les périodes d'interdiction d'épandage fixés ;
- Obligation d'une gestion adaptée des terres en ce qui concerne :
 - la gestion des résidus de récolte,
 - le respect d'une distance minimale de deux mètres pour l'implantation des cultures à l'exception des prairies permanentes ou temporaires par rapport aux berges des cours d'eau,
 - tout CTE signé dans la zone vulnérable pour une exploitation riveraine d'un cours d'eau devra comprendre une mesure d'implantation de cultures enherbées d'au moins cinq mètres de large, ou de localisation judicieuse de jachère en bordure de ruisseau, ou de plantations, ou entretien de haies, sur la totalité du linéaire de la berge comprise dans l'exploitation hors linéaire déjà bordé d'une ripisylve.

Chapitre 3. Problématique de l'étude et objectifs du travail

I - Problématique et objectifs du travail

Le cas du bassin versant Aveyron-Lère est un exemple de conflit d'usage d'un bien commun, où un ensemble d'acteurs sont concernés par l'allocation de la ressource eau et le maintien de sa qualité. L'agriculture joue ici un rôle important en tant que consommatrice la plus importante et comme source de détérioration de la qualité en raison du lessivage des nitrates.

La situation présentée au-dessus pour le bassin versant de l'Aveyron aval – Lère nous amène à nous poser certains questions :

- ❑ Est-il possible d'arriver à un accord entre acteurs qui puisse résoudre les problèmes d'allocation de la ressource eau et d'arrêter la diminution de sa qualité dans le bassin versant de l'Aveyron – Lère ?
- ❑ Pouvons-nous, comme chercheurs, appliquer nos connaissances et nos outils pour faciliter les négociations entre acteurs dans ce conflit d'usage ?
- ❑ Quel est le rôle de l'agriculture dans le conflit ? Et dans le problème spécifique de contamination azotée des eaux ?
- ❑ Est-il possible, par le changement des pratiques culturales, de réduire la pollution par les nitrates ?
- ❑ Quels sont les assolements et les pratiques culturelles les plus respectueuses de l'environnement ?

En 1999, les équipes de recherche du Cemagref et de l'INRA concernés par la thématique « activités agricoles et forestières, qualité des eaux et des milieux aquatiques » ont reçu de leurs directions respectives un appel d'offre. Ces deux organismes partent d'un double constat : la gestion de l'eau évolue et les travaux de recherche sur cette gestion sont souvent mono-disciplinaires. La recherche tente d'apporter des réponses aux problèmes de gestion de la ressource subissant comme conséquence de la croissance démographique et de la diversification des usages de la ressource. Elle essaie de trouver le rôle de l'agriculture dans ces conflits d'usage.

Le Cemagref et l'INRA ont comme objectif dans ce projet de « contribuer à l'amélioration des techniques et à l'élaboration de modes de gestion des systèmes agricoles, forestiers et hydrologiques pour valoriser la ressource en eau et préserver les systèmes aquatiques » (appel à intention dans Action Scientifique Structurante INRA-Cemagref, fév 1999). Ce travail de recherche est qualifié d'« Action Scientifique Structurante » et se nomme en l'occurrence « action AQUAE ». Plusieurs travaux ont été développés dans le même cadre dans le but d'évaluer la situation actuelle et les solutions possibles, mais la négociation entre les acteurs impliqués dans l'usage de la ressource eau dans le bassin de Aveyron aval – Lère n'est pas arrivée à sa fin.

L'UMR d'Economie Publique de l'INRA Paris-Grignon, organisme avec lequel j'ai fait mon stage, a décidé de reprendre le sujet suivant : à travers l'élaboration d'un modèle du fonctionnement du bassin, nous avons essayé d'évaluer à différents niveaux d'agrégation les consommations d'eau et l'impact environnemental des pratiques culturales actuelles et possibles pour faciliter les négociations entre les acteurs impliqués dans le problème de l'allocation de l'eau et de la contamination azotée dans le bassin versant Aveyron-Lère.

II - Méthode et démarche générale

Pour construire un cadre de négociation autour du choix des techniques en rapport avec la consommation d'eau et l'utilisation de l'azote, il est nécessaire d'évaluer l'impact des alternatives possibles et de rechercher des solutions négociables. Ces alternatives possibles sont établies à l'aide de modèles bio-économiques de représentation du fonctionnement des exploitations et des cultures.

A partir des différentes simulations, nous pouvons définir, plus qu'une solution de planification, un cadre de négociation entre les différents acteurs. La démarche comporte les phases suivantes :

1. **Obtention des données de base.** Nous avons utilisé les déclarations d'assolement de l'année 2000 (fiches d'assolement détaillées de 1700 exploitations de la zone) et les fiches de culture fournies par le groupe de pilotage constitué lors de la première phase du projet.
2. **Elaboration d'une typologie des exploitations.** Comme le nombre des exploitations (1700) était trop élevé, nous avons construit une typologie à partir du traitement des données par Analyse en Composantes Principales (ACP), technique mathématique permettant de réduire un système complexe de corrélations en un plus petit nombre de dimensions à travers l'analyse des liaisons linéaires existant entre les variables impliquées (produit brut, taille, productions...). A partir de cette analyse, nous avons construit des groupes, c'est-à-dire des types d'exploitation. Pour chacun de ces groupes, nous avons choisi une exploitation représentative (exploitation type). Pour les exploitations types, nous devons connaître la relation entre les facteurs utilisés et les produits obtenus, ainsi que les contraintes auxquelles elles sont soumises.
3. **Génération des données non observées** à travers des simulations et des scénarios avec le logiciel CropSyst. Il s'agit d'un modèle de simulation des cultures qui nous permet d'estimer des données manquantes relatives à l'effet des opérations des cultures sur la récolte et sur l'environnement, telles que la quantité d'azote lixivié. Ainsi, nous avons créé à partir de CropSyst une base de données sur les rendements et les pertes d'azote pour chaque culture dans les différents types années climatiques et dans les trois sols présents dans le bassin versant, données qui seront introduites après au niveau du modèle économique.
4. **Construction d'un modèle agro-économique** reproduisant l'agriculture du bassin qui nous permettra d'analyser les effets des changements climatiques et des techniques dans l'entreprise agricole. Ce modèle sera construit avec le logiciel Olympe, grâce auquel nous pourrons générer à partir des données individuelles (déclarations d'assolement et données générées par CropSyst) le modèle agrégé et puis tester différentes variantes de gestion et évaluer pour les différentes situations climatiques et les différents sols son effet sur les rendements économiques et sur l'environnement.
5. **Proposition des scénarios possibles** capables de réduire la consommation d'eau et la lixiviation des nitrates au niveau régional. Ces scénarios sont construits à partir de CropSyst (proposition de nouvelles techniques de production avec doses d'eau et d'azote plus adaptées aux besoins des cultures) et de la programmation linéaire (nouvelle organisation des terres : proposition de nouveaux assolements optimaux sous contraintes d'eau et de lixiviation) Comparaison avec Olympe des impacts environnementaux et économiques des techniques testées.

Ces différentes étapes seront plus largement décrites dans la suite de ce rapport.

Le but final de cette démarche est de faciliter l'établissement d'un dialogue entre les acteurs de la zone à travers la discussion des résultats obtenus dans les simulations, en suivant la conception de l'aide à la décision comme un processus de pilotage stratégique.

Nous voulons démontrer avec cette démarche les **hypothèses** suivantes :

1. L'utilisation du modèle bio-physique CropSyst va permettre en connexion avec un simulateur technico-économique de mieux contrôler les effets des changements techniques et culturels sur la pollution azotée.
2. Les outils de simulation vont faciliter la négociation entre acteurs dans un conflit d'usage d'un bien commun (ressource eau).

Partie II

Matériels et méthodes

Partie II . Matériels et méthodes

Chapitre 1. Choix des outils

Notre objectif est d'analyser les systèmes de cultures existants dans le bassin versant Aveyron-Lère afin d'établir les effets des modes de gestion en terme d'irrigation et de fertilisation azotée sur l'environnement (disponibilité d'eau, pollution azotée) et sur la marge des agriculteurs, et puis l'impact de ces modes de gestion au niveau régional. Il nous faut pour cela simuler l'impact de la structure et du mode de conduite des cultures sur les indicateurs d'évaluation des systèmes que nous avons identifiés : la consommation d'eau, la lixiviation des nitrates et la marge brute procurée par les cultures.

Cette analyse doit tenir compte de la variabilité observée sur le climat (pluviométrie irrégulière selon les saisons et les années) et doit être valable à l'échelle des exploitations représentatives et de l'ensemble du bassin. Elle doit donc prendre en compte la variabilité des caractéristiques hydrodynamiques des sols, des choix des cultures, et des modes de gestion de l'irrigation et de la fertilisation azotée, variables en fonction des années climatiques.

Une fois modélisé le système agricole du bassin et comprises les relations entre les modes de gestion et les indicateurs considérés, nous allons proposer des changements dans le but d'améliorer la gestion de la ressource eau au niveau de l'ensemble du bassin (*voir Figure 3*)

Nous avons fait le choix d'utiliser un logiciel de simulation agro-économique (Olympe) capable de calculer par exploitation la marge de l'agriculteur, l'eau consommée et les quantités totales d'azote lixiviées.

Ce calcul doit se faire à l'échelle d'exploitations représentatives du bassin pour être ultérieurement extrapolée à l'ensemble du bassin. Elle doit prendre en compte la capacité des agriculteurs à ajuster le choix des cultures et de leur mode de conduite au cours de l'année en fonction de la pluviométrie observée (et espérée) et en fonction des besoins en fourrages.

La caractérisation de l'exploitation doit se faire à deux niveaux :

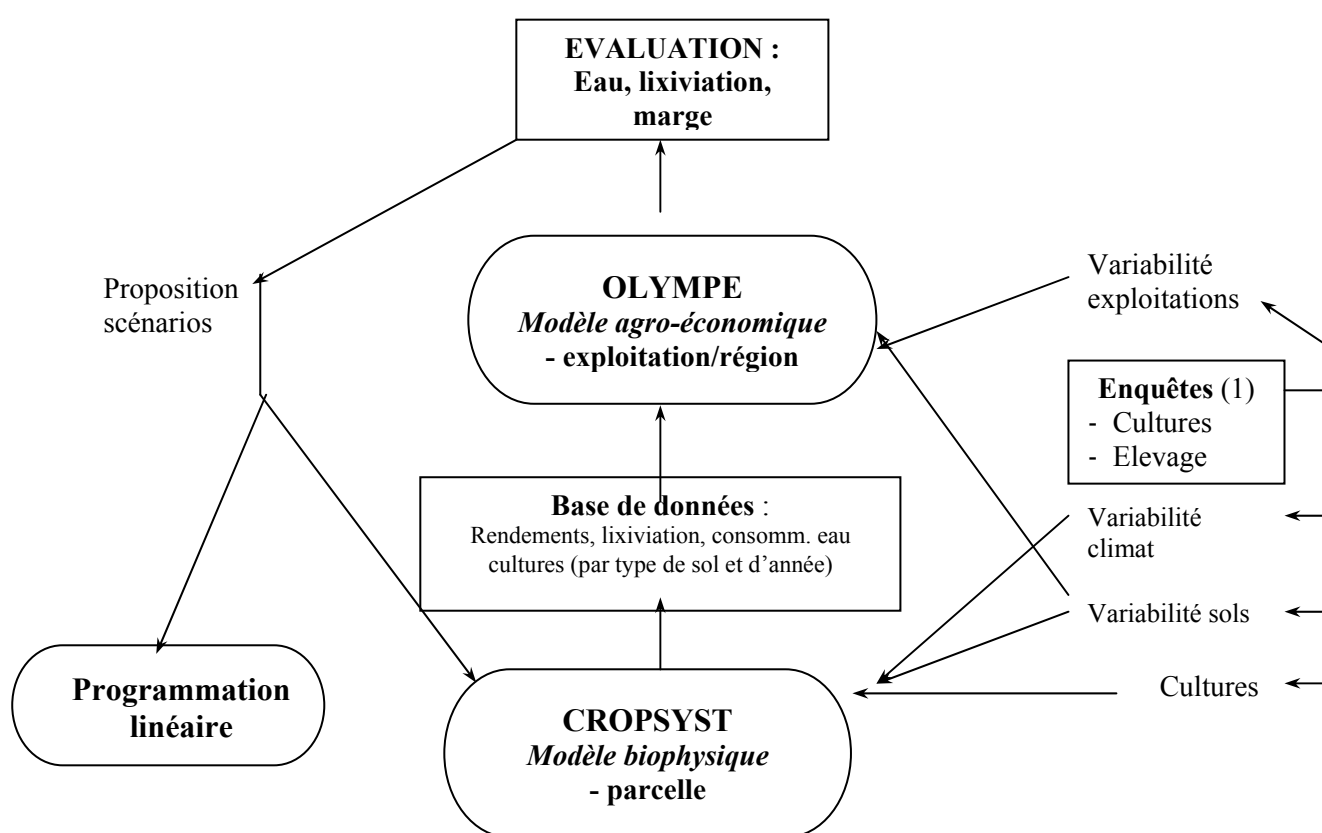
- ◆ D'abord, du **point de vue de la structure** (taille de l'exploitation, type de culture, itinéraire technique, prix de vente des produits...). Ces informations seront recueillies principalement à partir des déclarations d'assolement et des fiches de culture fournies par le groupe de pilotage.
- ◆ Ensuite, du point de vue des **processus de fonctionnement** à l'échelle de la parcelle. Il s'agit d'établir pour chaque type de culture une fonction de production mettant en relation la fertilisation azotée et l'irrigation avec les quantités d'azote lixiviées et le rendement de la culture. Ces fonctions seront établies par type de sol et d'année climatique.

L'établissement de cette **base de données** suppose que nous disposions d'un **modèle de cultures** (issu du modèle CropSyst) ayant les caractéristiques suivantes : être capable de reproduire le fonctionnement du système sol-plante à l'échelle de la parcelle afin d'établir des courbes de réponse de la culture (rendements et lixiviation du nitrate) à l'eau et à l'azote, pour chaque type de sol et chaque type d'année climatique.

Dans la dernière partie de notre travail, nous voulons proposer des nouveaux modes de gestion plus adaptés aux contraintes d'eau et de lixiviation qui affectent le bassin. On va essayer deux types de solutions :

- 1) A travers la base de données créée avec CropSyst, on va chercher le niveau optimum des intrants (notamment eau et azote) qu'on doit appliquer aux cultures.
- 2) Un deuxième scénario sera basé sur la redistribution des surfaces, sans changement des techniques appliquées pour chaque culture. Pour chercher les assolements optimaux, nous utiliserons un **modèle de programmation linéaire** excel, capable de nous donner les assolements avec lesquels on pourra obtenir les marges optimales sous un certain nombre des contraintes.

Figure 3 : Schéma qui montre les outils utilisés dans notre travail et l'enchaînement entre eux



(1) Le terme « enquêtes » représente ici les données fournies par les acteurs ; dans notre cas, il comprend les déclarations d'assolement de l'année 2000 et les fiches de culture remplies par le groupe de pilotage.

Chapitre 2. Obtention et analyse des données

I - Collecte des données

Comme données de base, nous avons récupéré d'abord les documents d'études préalables qui ont servi à l'élaboration du contrat de la rivière Aveyron aval – Lère et qui contiennent des informations sur les caractéristiques physiques de l'hydrosystème, sur les usages ainsi qu'une synthèse des enjeux et des voies de progrès tels qu'ils ont été identifiés lors d'un atelier de prospective réunissant 70 acteurs intéressés par la gestion du bassin versant (élus, administrations, collectivités, associations...)

Une première classification des exploitations a été construite à partir des déclarations individuelles d'assolement (année 2000) fournies par la DDAF, qui nous donnent des informations sur les assolements, les superficies irriguées et les effectifs animaux des exploitations, mais ne contiennent aucune donnée sur les exploitants et leurs familles (âge, succession, main-d'œuvre, autres activités). Cette première analyse montrait une grande diversité des dimensions, des systèmes de cultures et d'élevage des exploitations et des comportements par rapport à la gestion de l'eau. Elle a été poursuivie et affinée en 2001 par une enquête complémentaire auprès d'environ 1700 exploitations, à partir de laquelle on a construit une typologie qui montre les différents types d'exploitation de la région par rapport à la zone (type de sol), taille et assolement pratiqué. Cette typologie a été déjà validée et corrigée par un groupe de pilotage dans les réunions mises en place en 2001. Ce même groupe de pilotage nous a fourni des fiches de culture pour les productions les plus significatives du bassin, qui détaillent les intrants et les produits pour chaque culture selon la zone dans laquelle elle se situe et selon le type d'année climatique.

Par rapport aux données climatiques, nous les avons récupérées de la station de Montauban, complétées par les données de Lauragais.

II - Détermination d'une typologie des exploitations

Le nombre d'exploitations enquêtées est trop élevé pour introduire ces données directement dans les modèles, ce qui a obligé à réaliser une typologie qui constitue une représentation de l'agriculture de la région. Le procès de construction de la typologie consiste à classer les exploitations grâce au logiciel Spad dans des « types » qu'on a défini suivant des critères de taille, zone et type de production. Ensuite, on a choisi une exploitation représentative pour chaque groupe, dont les données seront introduites dans les modèles et pondérées selon le nombre des exploitations qu'elles représentent.

Les critères considérés pour la classification des exploitations sont les suivants :

- ✚ 5 strates de taille (Tableau 6):

Tableau 6 : Strates de taille considérées pour la construction de la typologie des exploitations du bassin.

Strate	Taille
1	< 10 ha
2	10 – 20 ha
3	20 – 30 ha
4	30 – 50 ha
5	> 50 ha

- ✚ 5 zones, correspondant aux 5 régions naturelles décrites pour le bassin versant

(Tableau 7). Ces zones présentent 3 types de sols différents, ce qui donne des rendements et des taux de pollution aussi différents :

Tableau 7 : Zones considérées pour la construction de la typologie des exploitations du bassin et type de sol présente dans chacune d'entre elles.

Zones naturelles	Type de sol
Zone 1 : Causses calcaires	Sol 1 : argilo-calcaire
Zone 2 : Quercy blanc	Sol 1 : argilo-calcaire
Zone 3 : Vallées de l'Aveyron et la Lère	Sol 2 : sablo-limoneux
Zone 4 : Boulbènes	Sol 3 : argilo-limoneux
Zone 5 : Quercy vert	Sol 1 : argilo-calcaire

✚ 12 classes de production qui représentent les 12 systèmes de production aperçus dans la zone ; 2 d'entre les 12 classes, plus diversifiées à l'intérieur que les autres, ont été subdivisées en 2 et 8 sub-classes respectivement :

Tableau 8 : Classes de production définies pour l'élaboration de la typologie des exploitations du bassin.

Classe	Productions
1	Vaches laitières, maïs ensilage, quelques vaches allaitantes
2	Volailles, un peu d'ovins
3	Vaches allaitantes, ovins, caprins sans vaches laitières et sans maïs ensilage
4	Céréales irriguées (sorgho)
5	Maïs semence
6	Porcins
7	Grandes cultures, maïs grain, semences
8_1	Oléagineux non irrigué et terres cultivées de manière non permanente < 20 ha
8_2	Oléagineux non irrigué et terres cultivées de manière non permanente > 20 ha
9	Maraîchage
10	Vigne
11_poly	Polyculture diversifiée
11_arbo	Arboriculture diversifiée
11_NI	Polyculture non irriguée
11_viante	Eleveurs viande diversifiés
11_sem	Semenciers diversifiés
11_volaille	Volaille diversifiés
11_lait	Laitiers diversifiés
11_porcins	Eleveurs porcins diversifiés
12	Arboriculture

Pour chaque combinaison classe-strate-zone, nous avons pris comme exploitation représentative celle dont la surface s'approche le plus de la moyenne du groupe. Le nombre des combinaisons possibles est

$$\begin{aligned} & \text{N}^{\circ}\text{classes} \times \text{N}^{\circ}\text{strates} \times \text{N}^{\circ}\text{zones} \\ & 20 \times 5 \times 5 = 500 \end{aligned}$$

Sachant qu'il y a certains groupes vides, nous avons obtenu finalement 296 exploitations représentatives, qui caractérisent les 296 types d'exploitation différents qui peuvent apparaître dans le bassin versant.

Pour la construction du modèle du bassin, nous avons introduit les données détaillées de ces 296 exploitations et puis nous les avons pondérées par un coefficient égal au nombre total d'exploitations que chacune représente pour avoir les données totales au niveau régional. Nous montrons ci-après une série des tableaux qui expriment les caractéristiques de la typologie.

Le tableau 9 montre la distribution des exploitations du bassin dans les différentes classes de production.

Pour chacune des classes définies dans la typologie, nous montrons le nombre des exploitations qui la composent dans l'ensemble du bassin, la superficie agricole totale et utilisée qu'elle représente, la superficie agricole moyenne des exploitations de la classe, le produit brut total de l'ensemble des exploitations de la classe et le produit brut par ha :

Tableau 9 : Nombre des exploitations, SAU et produit brut par classe de production dans le bassin

Classe	Nombre	SAU Total (ha)	SAU culture (ha)	SAU moyenne(ha)	PB Total (F)	PB/ha (F/ha)
1. Elevage lait	160	9389,71	9065,64	55,66	63709812	7027,6
2. Elevagevolaille	11	951,36	9065,64	56,66	11355666	13367,3
3. Elevagebovin	358	18406,63	849,51	77,23	85568210	4963,0
4. Céréale irrigué	17	187,27	17241,23	48,16	1339681	7191,8
5. Maïs semence	68	3007,24	186,28	10,96	40306413	13503,0
6. Elevag porcin	6	320,05	2984,99	43,90	3087829	10016,3
7. Grandes cult.	193	4887,76	308,28	51,38	37363149	7664,6
8. Oléagineux	178	3647,65	4874,8	25,26	20855616	5836,0
9. Maraîchage	33	708,99	3573,63	20,08	13492745	19212,5
10. Vigne	28	898,44	865,87	30,92	12263470	14163,18
11. Polyculture	499	13242,46	13189,64	26,43	110683872	8391,72
12.Arboriculture	164	5122,52	3227,88	19,68	132996476	41202,42
Total	1715	60770,08	57070,04	33,28	533022940	9339,80

D'après les valeurs du tableau 9, nous pouvons voir que la classe élevage bovin (classe 3) est la plus représentée, suivie de la polyculture (classe 11), représentant à elles deux, 50% des exploitations, et puis de la production laitière (classe1), de l'arboriculture (classe 12), des grandes cultures (classe 7) et des oléagineux (classe 8) .

Par rapport aux résultats économiques, c'est l'arboriculture (classe 12) celle qui comporte le produit brut dégagé le plus important, bien qu'elle ne soit pas la classe la plus représentée, probablement à cause des exigences de la culture, notamment le type de sol. Elle est suivie de près par la polyculture (classe 11), et après l'élevage bovin (classe 3) et du bovin lait.

Par rapport à la taille des exploitations, chaque classe présente une distribution différente, comme nous pouvons voir dans le tableau 10, ci-dessous :

Tableau 10 : Nombre des exploitations par taille dans chaque classe de production

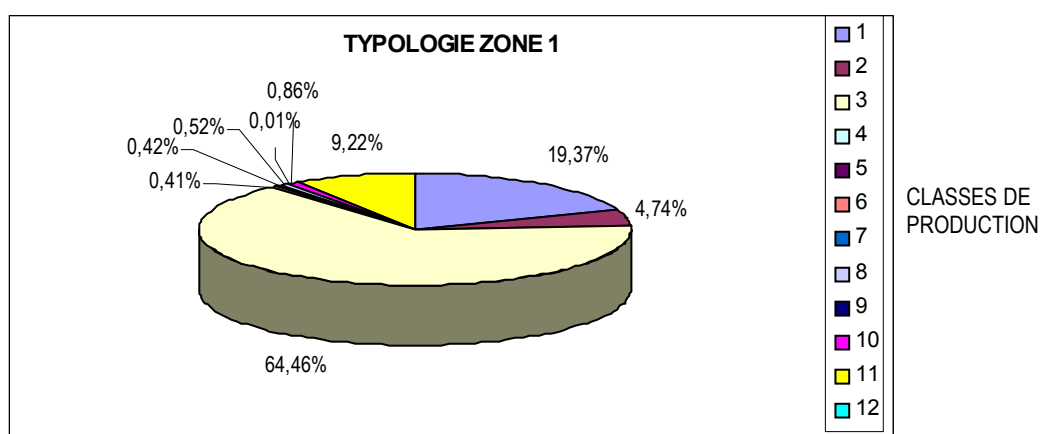
Classe de production		Strates de taille					Total
		1	2	3	4	5	
1. Elevage lait		0	2	20	54	84	160
2. Elevage volaille		0	0	0	2	9	11
3. Elevage bovin		25	47	55	91	140	358
4. Céréales irrigué		10	6	1	0	0	17
5. Maïs semence		5	9	7	28	19	68
6. Elevage porcin		0	0	2	2	2	6
7. Grandes cultures		60	38	35	34	26	193
8. Oléagineux		64	50	27	23	14	178
9. Maraîchage		11	10	6	3	3	33
10. Vigne		5	4	7	6	6	28
11. Polyculture		121	121	105	85	67	499
12. Arboriculture		39	60	35	18	12	164
	Total	340	347	300	346	382	1715

Les exploitations d'élevage (classes 1, 2, 3, 6), avec une production agricole plus extensive, sont plus nombreuses dans les strates de taille supérieures, les céréalières (classe 4), les grandes cultures (classe 7), les oléagineux (classe 8), les maraîchers (classe 9), et la polyculture (classe 11) sont représentées par des exploitations plutôt de petite taille. Dans l'ensemble des exploitations du bassin, si on considère toutes classes confondues, toutes les strates de taille présentent un nombre identique d'exploitations.

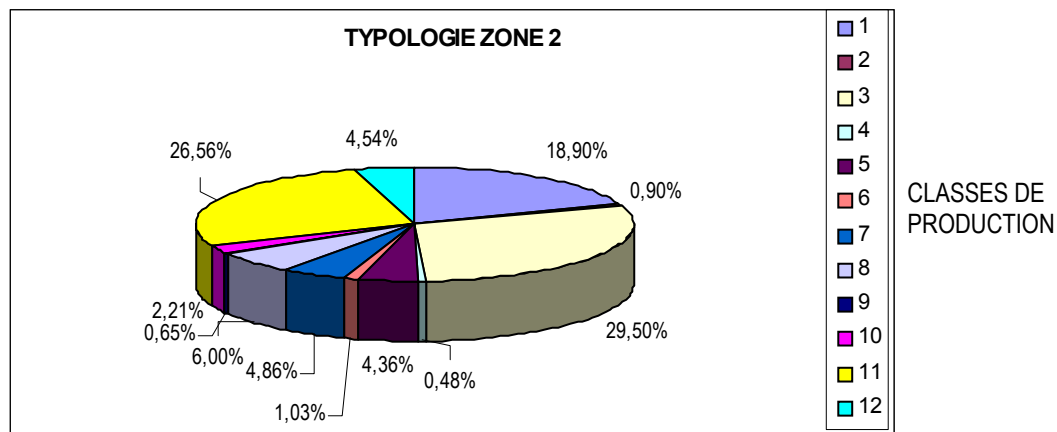
Par rapport aux exploitations de chaque zone (les 5 régions naturelles définies dans la première partie de ce rapport), ses caractéristiques sont définies dans les graphes ci-dessous, qui rassemblent la distribution des classes de production par zone. Ceci nous donne une idée des productions les plus développées dans chaque cas :

Graphique 4 : Distribution des classes de production par zone – pourcentage de sa superficie par rapport à la superficie totale de la zone.

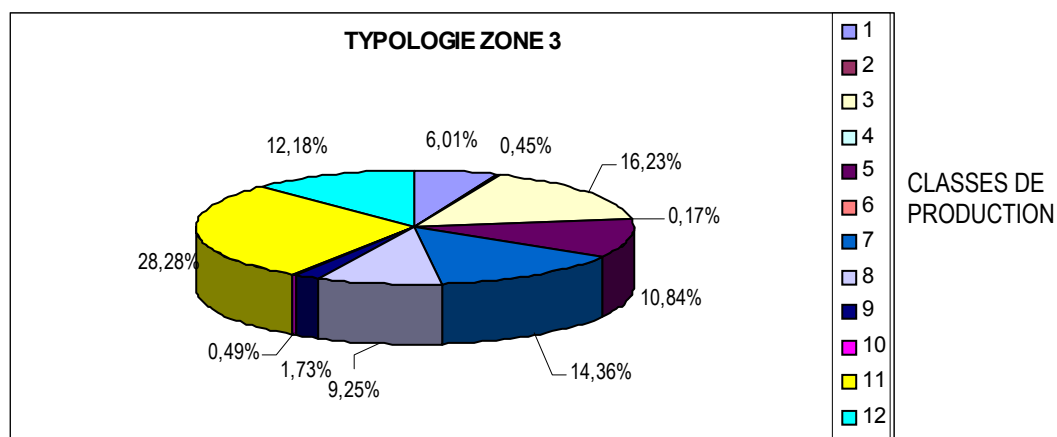
4.1. Typologie des exploitations dans la zone 1



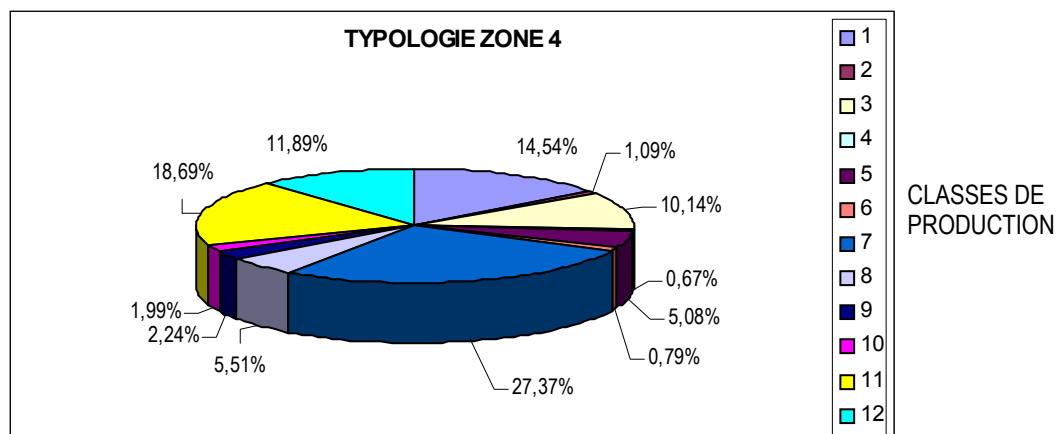
4.2. Typologie des exploitations dans la zone 2



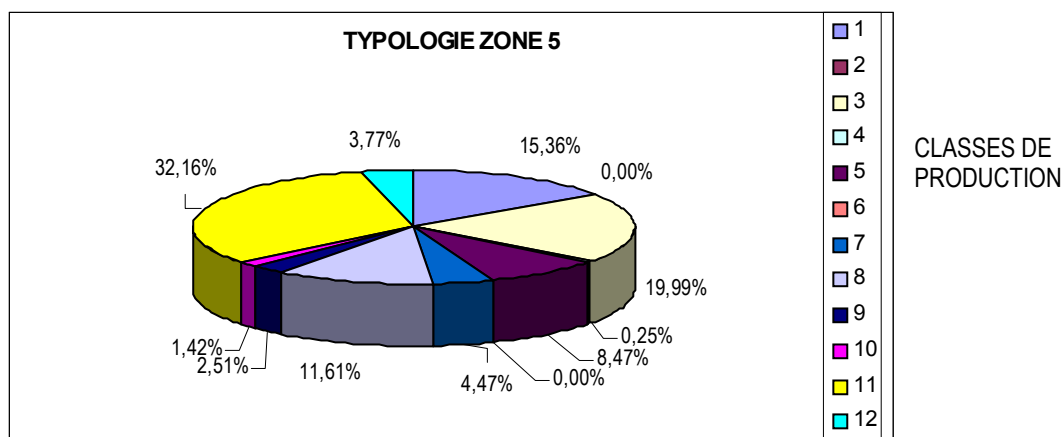
4.3. Typologie des exploitations dans la zone 3



4.4. Typologie des exploitations dans la zone 4



4.5. Typologie des exploitations dans la zone 5



D'après ces graphes, nous pouvons constater que l'élevage est l'activité prédominante dans la zone de Causses (zone 1), où les exploitations types 3 (élevage bovin) et 1 (élevage lait) représentent 84% de la surface totale. L'élevage reste encore prédominant dans le Quercy Blanc (zone 2), mais son pourcentage est ici plus bas. En effet, on constate que la polyculture augmente plus rapidement que l'élevage.

Dans les sols d'alluvions (zone 3), le pourcentage le plus haut correspond aux exploitations avec de la polyculture, suivies des éleveurs, des grandes cultures et des arboriculteurs. C'est dans cette zone-ci, celle où les sols sont les plus perméables, que la culture de maïs semences (grande consommatrice d'eau et d'azote) atteint le pourcentage le plus haut.

Les zones de boulbènes (zone 4), les plus sensibles à la pollution, présentent une prédominance des grandes cultures, puis la polyculture, les vaches laitières et l'arboriculture. Le maïs semences occupe 5,08% de la surface totale. Finalement, dans le Quercy Vert (zone 5) la polyculture occupe le premier lieu, suivie de l'élevage, les vaches laitières et les oléagineux.

L'annexe 3 montre l'analyse des caractéristiques des exploitations par commune (nombre des exploitations, SAU, produit brut dégagé, distribution par taille et type de production), ainsi que les chiffres sur les effectifs animaux qu'on trouve dans chaque canton.

La construction d'une typologie des exploitations nous a permis d'apercevoir la complexité du système agricole du bassin. Il existe une grande variabilité des systèmes de production, qui est la conséquence d'un milieu aussi variable par rapport au relief, type de sol et disponibilité d'eau, nous devons prendre en compte cette hétérogénéité au moment de chercher des solutions aux problèmes de la gestion de la ressource eau.

Dans notre démarche, l'étape suivante est la construction du modèle de fonctionnement de l'agriculture du bassin, modèle qui doit être capable d'intégrer la variabilité du système pour pouvoir arriver à trouver des solutions valables.

Chapitre 3. Construction d'un modèle régional

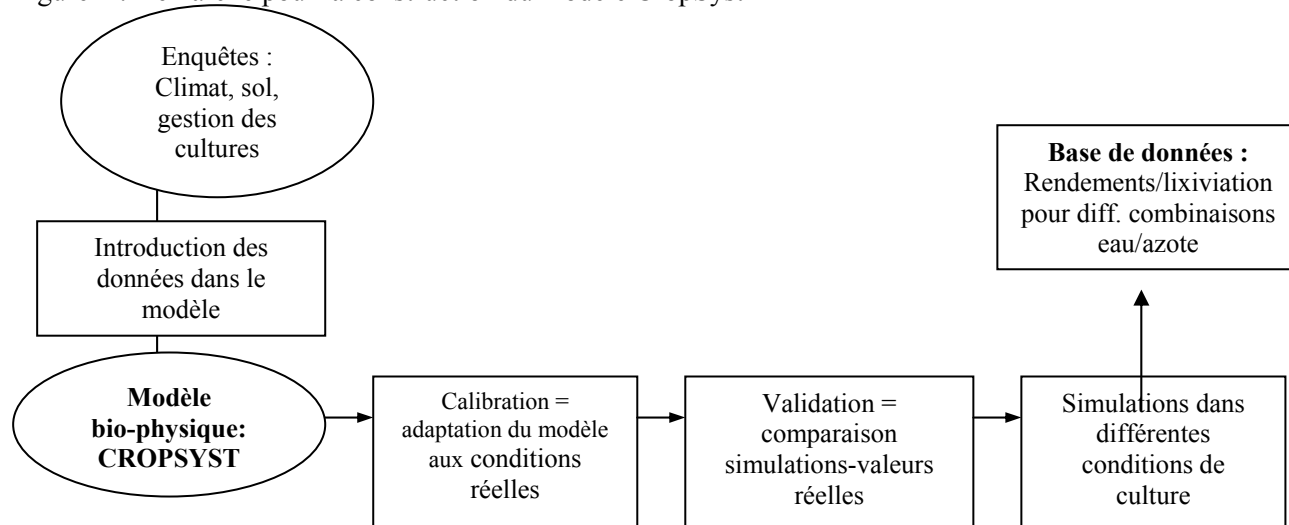
I - Introduction

Une fois collectées (i), les données nécessaires sur le milieu (sol, climat) (ii) les activités pratiquées dans les exploitations du bassin (ii) construit la typologie qui caractérise ces exploitations, nous pouvons procéder à la construction du modèle régional. Comme nous avons décrit dans le Chapitre 1 (voir Figure 3), nous allons commencer par le modèle bio-physique (CropSyst), à partir duquel nous obtiendrons une base de données qui va intégrer les valeurs de rendements, consommation d'eau, consommation d'azote et lixiviation des nitrates dans chaque type de sol et chaque type d'année pour les principales cultures de la région. Ensuite, cette base de données sera intégrée au niveau du modèle agro-économique (Olympe), processus qui constitue le couplage entre les deux modèles. La construction des modèles, ainsi que leur couplage sont détaillés dans les prochaines parties de ce chapitre.

II - Modèle bio-physique : CROPSYST

Pour la construction du modèle agro-économique, nous avons besoin d'un certain nombre de données. Une partie d'entre elles (données climat, analyses de sols, gestion des cultures) a été fournie par les enquêtes de terrain ou par les fiches de culture remplies par le groupe de pilotage ; d'autres, relatives aux rendements dans des conditions spécifiques ou à la lixiviation azotée, n'ont pas pu être déterminées. Pour l'estimation de ces données-ci, nous avons choisi le logiciel CropSyst, un modèle de simulation pluriannuel et journalier dont l'objectif est d'évaluer les effets du climat, du sol et de la gestion des cultures sur les rendements et l'environnement. Il nous permet d'introduire dans le modèle les données qui caractérisent notre système de culture et de simuler : le bilan hydrique dans le sol, le bilan d'azote sol-plante, la phénologie de la plante, la croissance aérienne et racinaire, la production de la biomasse, le rendement... et il va nous permettre à la fois de déterminer les rendements et l'effet de la gestion des cultures en termes d'irrigation et de fertilisation sur l'environnement. L'utilisation de CropSyst exige son adaptation aux conditions locales de la région, procédé nécessitant l'ajustement de certains paramètres en comparant les résultats simulés avec CropSyst à ceux obtenus réellement. Une fois calibré et validé, un grand nombre de simulations peuvent être réalisées afin d'examiner les effets des possibles changements au niveau des pratiques des agriculteurs sur les variables de sortie telles que les rendements et la lixiviation de nitrates. Les difficultés du modèle sont plutôt concentrées sur la collection des variables nécessaires et sur la nécessité d'avoir des connaissances agronomiques. La construction du modèle bio-physique est composée de plusieurs étapes, comme on peut le voir dans la figure 4 :

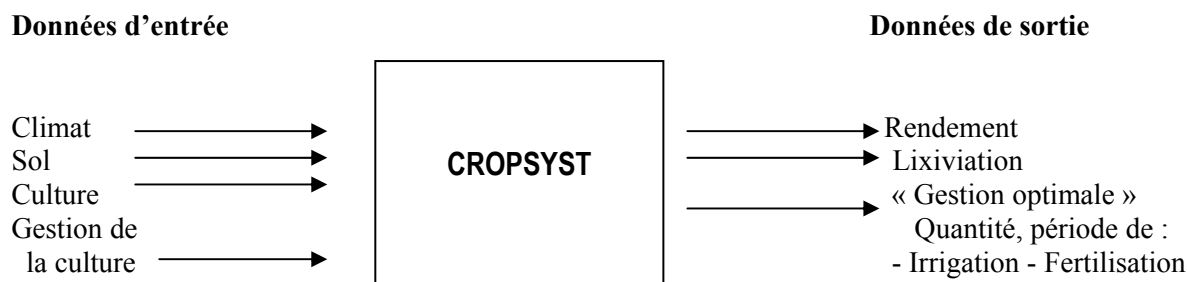
Figure 4 : Démarche pour la construction du modèle CropSyst



Description du modèle

CropSyst est un modèle de simulation de culture, qui reproduit de manière dynamique à partir des lois biologiques et physiques connues ou de relations empiriques le fonctionnement du sol et de la plante en fonction du climat et des pratiques culturales. Le modèle permet de simuler, à l'échelle d'une parcelle bien définie du point de vue sol, climat, succession de cultures et mode de gestion : le rendement, la lixiviation de nitrates et la consommation d'eau par les cultures.

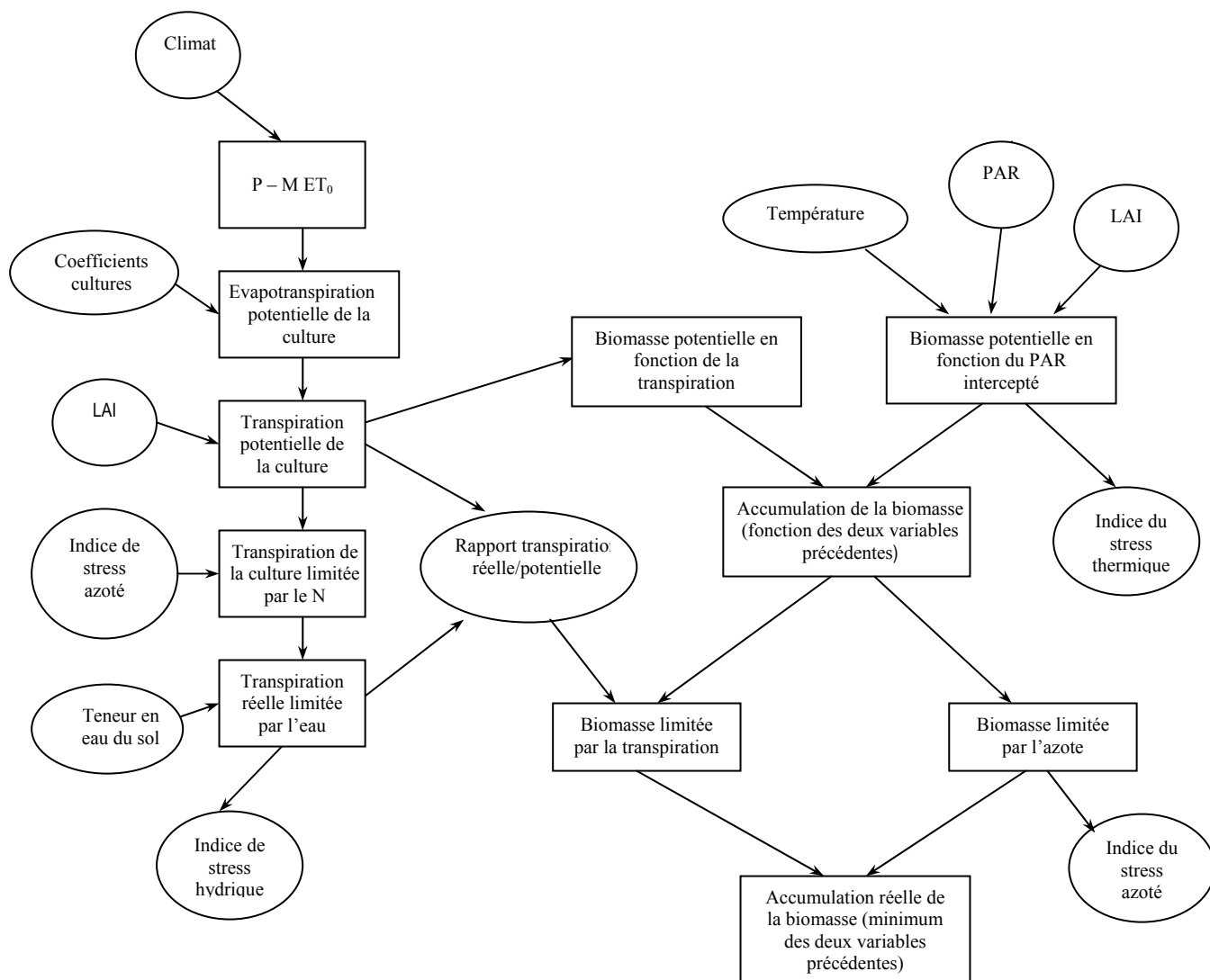
Figure 5 : Structure du simulateur CropSyst : données d'entrée et de sortie du modèle



La simulation comprend :

- Bilan hydrique : il inclut la précipitation, irrigation, écoulement, infiltration, redistribution d'eau dans le profil du sol, percolation profonde, transpiration des plantes et évaporation. Il existe la possibilité de choisir la méthode pour calculer l'évapotranspiration de la plante : méthode Priestley-Taylor ou Penman-Monteith. Le choix de la méthode sera fait en fonction de la disponibilité des données nécessaires.
- Bilan azoté : le bilan d'azote minéral se compose des bilans séparés pour le nitrate et l'ammonium. Le processus inclut les transformations du nitrate, l'absorption d'ammonium, la fixation symbiotique et la demande des cultures.
- Phénologie des cultures : sa simulation est basée sur l'accumulation journalière des températures au dessus d'une température de base et au dessous d'une température maximale pour arriver à certains stades de croissance
- Accumulation de la biomasse aérienne : la base des calculs est la détermination de la biomasse potentielle (sans stress) à partir de la transpiration potentielle de la culture et de la fraction de la radiation photosynthétique active ($PAR = \text{photosynthetically actual radiation}$) interceptée par la plante. Cette biomasse potentielle est soumise quotidiennement au stress hydrique et azoté. Dans CropSyst, les indices de stress sont définis comme étant le rapport de la biomasse permise par les conditions de culture par rapport à la biomasse potentielle permise par le rayonnement et la température. Ce rapport est calculé chaque jour, pour plusieurs facteurs de stress (radiation, température, eau, azote, salinité) et durant tout le cycle de développement de la culture. Le schéma ci-dessous (Figure 6) explique la logique suivie par CropSyst pour calculer l'accumulation journalière de biomasse :

Figure 6 : Fonctionnement de CropSyst : facteurs impliqués dans le calcul de l'accumulation de la biomasse



Source : Stöckle, Donatelli et al (2003) *Cropsyst, a cropping system simulation model. European journal of agronomy*, Volume 18

- Développement de la surface foliaire : l'augmentation de la surface foliaire pendant la période végétative, exprimée comme surface de feuille par unité de surface de sol ($LAI = leaf\ area\ index$), est calculée comme fonction de la biomasse accumulée.
- Croissance des racines : on considère la croissance en profondeur et en densité des racines. Elle est synchronisée avec la croissance des feuilles et soumise également au stress hydrique et azoté. La croissance des racines continue jusqu'à ce qu'elles atteignent la profondeur maximale, paramètre qu'on définit au préalable pour chaque culture.
- Le rendement : il dépend de la biomasse totale cumulée au stade maturité physiologique et de l'indice de récolte.

Données nécessaires pour la construction du modèle

Pour la construction du modèle, il est nécessaire d'introduire certains paramètres qui caractérisent la zone, le climat, les cultures et le sol. Ces données vont être organisées dans 5 fichiers : simulation, localisation, sol, culture et gestion.

- Le fichier de simulation. Nous devons préciser la date de début et de fin de la simulation, ainsi que la rotation que nous voulons simuler et les valeurs de certains paramètres qui font référence aux conditions de départ.
- Fichier de localisation : nous précisons ici la situation géographique de la zone (latitude) et le fichier de climat à utiliser, nous choisissons la méthode de calcul de l'évapotranspiration de la plante et d'autres paramètres associés. Dans notre cas, on a utilisé une série climatique de 22 années (1970 - 1991) de la station Montauban, complétée par des données de Lauragais, qui comprend des valeurs journalières sur la précipitation, la température maximale, la température minimale et la radiation solaire. Comme méthode de calcul de l'ETP, nous avons choisi celle de Priestley-Taylor, puisque le modèle de Penman-Monteith demande des valeurs sur l'humidité relative et sur la vitesse du vent que nous ignorons.
- Le fichier sol contient les caractéristiques du sol par couche. On doit préciser pour chacune d'entre elles son épaisseur et sa texture ; à partir de ces valeurs, le modèle calcule la densité du sol, le volume d'eau à la capacité au champ et au point de flétrissement permanent, le potentiel d'entrée d'air et la liaison entre le volume d'eau contenu dans le sol et le potentiel d'eau. Dans nos simulations, nous avons utilisé les résultats des analyses de trois sols types du département Tarn et Garonne, publiés par la chambre d'agriculture Midi-Pyrénées :

Tableau 11 : Sol argilo-calcaire (terreforts) [Revel JC (1982), thèse]

Profond (cm)	Granulométrie (%)					M.O. (%)	Calcaire Total (%)	pH eau	C.E.C. (meq/100g)				Taux sat S/T (%)
	Argile	LF	LG	SF	SG				K	Ca	Mg	T	
0-25	34	25	16	15	9	1,8	1,4	7,9	0,20	25	1,10	19	100
25-50	34	27	15	15	8	1,3	0,0	7,8	0,15	23	1,10	19	100
50-75	35	33	12	9	4	0,5	0,0	7,9	0,14	26	1,60	22	100
75-105	41	33	12	10	3	0,4	0,0	8,0	0,17	25	1,90	22	100
115-140	34	45	12	5	3	0,1	25,0	8,5	0,13	38	3,70	17	100
>140	54	29	9	4	3	0,1	3,0	8,4	0,28	40	5,90	24	100

Source : www.cra-mp.org/morpho

Tableau 12 : Sol sablo-limoneux (alluvions) [INRA (1970), profil n°1]

Profond (cm)	Granulométrie (%)					M.O. (%)	Calcaire Total (%)	pH eau	C.E.C. (meq/100g)				Taux sat S/T (%)
	Argile	LF	LG	SF	SG				K	Ca	Mg	T	
10-21	15	20	28	32	2	2,5	70	8,2	0,16	36,6	0,80	14,3	100
38-51	9	12	19	46	14	0,7	64	8,5	0,13	32,4	0,60	7,6	100
51-64	9	12	18	51	11		66	8,5	0,06	32,7	0,60	7,3	100
81-92	8	11	20	49	13		68	8,6	0,04	32,7	0,70	6,8	100
92-100	5	6	7	39	44		41	8,6	0,04	29,9	0,60	4,2	100

Source : www.cra-mp.org/morpho

Tableau 13 : Sol argilo-limoneux (boulbènes) [INRA (1989), profil P'8]

Profond (cm)	Granulométrie (%)					M.O. (%)	pH eau	C.E.C. (meq/100g)				Taux sat S/T (%)
	Argile	LF	LG	SF	SG			K	Ca	Mg	T	
0-18	13	28	45	10	4	1,2	6,9	0,08	7,5	0,60	8,3	99
30-38	15	28	44	10	3	0,8	7,8	0,06	8,2	0,60	8,9	100
38-50	24	30	36	9	2	0,5	8,1	0,08	9,0	1,00	10,5	96
50-70	34	29	29	8	2		8,1	0,14	12,0	2,40	16,3	90
95-110	32	33	27	8	1		7,0	0,15	11,5	4,60	20,4	81

Source : www.cra-mp.org/morpho

Avec, LF = limon fin
 LG = limon gros
 SF = sable fin
 SG = sable gros

M.O. = matière organique
 C.E.C. = capacité d'échange cationique

- Fichier de gestion : il comprend les opérations de gestion de la culture, qui peuvent être programmées à des dates fixes ou bien relatives aux stades phénologiques de la plante. Les opérations programmées incluent l'irrigation (date d'application, volume d'eau appliqué) et fertilisation azotée (date d'application, quantité, source, mode d'application). On s'est basé pour cette partie sur les fiches de culture remplies et validées par le groupe de pilotage, où ils ont spécifié par type de sol et type d'année climatique les rendements obtenus, la quantité des intrants apportés, ainsi que d'autres détails de gestion.
- Fichier de culture : c'est un fichier clef pour la simulation, qui comprend les modules suivants :
 - Phénologie. Nous précisons ici les besoins de températures de la culture pour arriver aux différents stades de développement.
 - Morphologie : LAI maximale, profondeur des racines, SLA (= surface foliaire spécifique) et d'autres paramètres qui déterminent les caractéristiques foliaires et racinaires.
 - Croissance : coefficient de transpiration de la biomasse, efficacité d'utilisation de la radiation, paramètres de réponse au stress
 - Nitrate : azote demandé par la culture et capacité d'absorption des racines
 - Indice de récolte : rapport entre la quantité récoltée et la biomasse totale

Calibration et validation du modèle

Après l'introduction des données, nous devons **calibrer** le modèle, c'est-à-dire ajuster les paramètres pour les adapter aux conditions particulières de la région. Il s'agit de plusieurs phases « aller-retour » entre les solutions du modèle et la réalité observée, dans le but d'arriver à un modèle qui reproduit bien le fonctionnement des cultures. Ceci implique de paramétrer le modèle pour chaque combinaison culture-climat-sol.

Le calibrage du modèle nécessite l'ajustement de certains paramètres dans un intervalle raisonnable de fluctuation déjà défini dans la bibliographie. Puisque le modèle estime le développement et la croissance des cultures répondant aux conditions optimales, les valeurs des paramètres qui décrivent la morphologie et les processus physiologiques doivent faire référence aussi aux conditions optimales de croissance. On devra prendre en compte les aspects suivants :

- Phénologie

Le premier pas est la définition correcte du cycle de la culture. Nous pouvons caler les dates d'émergence, floraison et maturité physiologique de la culture à travers le paramètre GDD (« growing degree days »). Le but est d'arriver à avoir comme sortie de la simulation, quand nous essayons les conditions réelles de culture, les mêmes dates que celles que l'on observe dans la réalité.

- Morphologie

Les paramètres clefs pour caractériser la morphologie de la plante sont, comme nous avons déjà vu, la profondeur maximale des racines et le coefficient d'extinction de la lumière. La bibliographie nous donne

une fourchette possible des valeurs, où nous devons trouver, grâce à des simulations successives, celles qui s'adaptent le mieux à notre situation particulière.

- Paramètres physiologiques de la culture

Ceux qui vont affecter le plus la croissance sont : la superficie spécifique des feuilles, le coefficient de répartition tige/feuille, durée de la feuille, température optimale de croissance et durée de son effet.

- Paramètres de croissance : production de biomasse potentielle en fonction de la transpiration et du rayonnement (PAR), biomasse limitée par l'eau et par l'azote.

Afin de choisir les années types, nous avons considéré la pluviométrie annuelle observée dans une série de 22 années (1970 – 1991, station Montauban), série qu'on présente dans le tableau 14. Parmi les valeurs de la série, nous avons sélectionné trois années types :

- Une année moyenne (1975), celle dont la pluviométrie annuelle s'approche le plus de la médiane de la série de 22 années.
- Une année sèche (1990), celle avec la déviation par rapport à la médiane la plus basse, après avoir écarté les deux valeurs extrêmes (la plus basse et la plus élevée)
- Une année humide (1971), celle avec la déviation la plus élevée après avoir écarté les valeurs extrêmes.

Tableau 14 : Précipitation totale annuelle et écart par rapport à la médiane. Données recueillies à la station météorologique de Montauban (1970-1991)

Année	P annuelle (mm)	Pann – médiane (mm)
1970	654	-33,0
1971	907,6	220,7
1972	847,3	160,4
1973	622,5	-64,5
1974	937,2	250,3
1975	690	3,0
1976	622,5	-64,5
1977	805,5	118,6
1978	776	89,1
1979	778,5	91,6
1980	752,5	65,6
1981	745,5	58,6
1982	725,7	38,8
1983	582	-105,0
1984	740,5	53,6
1985	577,8	-109,2
1986	517,5	-169,5
1987	547,5	-139,5
1988	683,9	-3,1
1989	392	-295,0
1990	480,5	-206,5
1991	676,5	-10,5

Médiane = 686,95 mm

Les simulations ont été faites pour les cultures suivantes : blé dur, blé tendre, maïs grain, maïs semences, sorgho en sec et en irrigué, tournesol en sec et en irrigué, cultures considérées par le groupe de pilotage comme les plus représentatives. Pour chacune d'entre elles, nous avons simulé l'année moyenne, sèche et humide dans les trois types de sol (terrefort, alluvions et boubènes) Pour le calage du modèle, nous avons comparé les rendements simulés par le modèle pour les années moyennes avec les valeurs données par le groupe de pilotage dans les réunions qui ont eu lieu pendant l'année 2001, ce qui nous a permis de caler les paramètres suivants :

Culture	K_{BT} (1) (kPa·kg/m ³)	K_{LB} (2) (g/MJ)	LAI max (3) (m ² /m ²)
Blé dur	5,0	3,5	6,0
Blé tendre	6,0	3,7	5,0
Maïs grain	10	6	6,0
Maïs semences	5	3,0	5,0
Sorgho sec	9	5,0	8,0
Sorgho irrigué	9,5	4,5	7,0
Tournesol	6	4	5,0

- Coefficient biomasse-transpiration (K_{BT}) = rapport entre la biomasse totale aérienne et l'eau absorbée par la plante, considérant cette dernière comme égale à l'évapotranspiration du couvert végétal.
- Efficience d'utilisation de la radiation (K_{LB}) = rapport entre l'accroissement de la biomasse et la valeur de la radiation solaire interceptée
- Surface foliaire maximale (LAI max) = superficie des feuilles par unité de superficie de sol

Après un grand nombre des simulations, les valeurs retenues pour ces coefficients sont :

Tableau 15 : Valeurs retenues après calibrage du modèle pour les coefficients transpiration-biomasse, radiation-biomasse et indice foliaire pour chaque culture simulée avec CropSyst

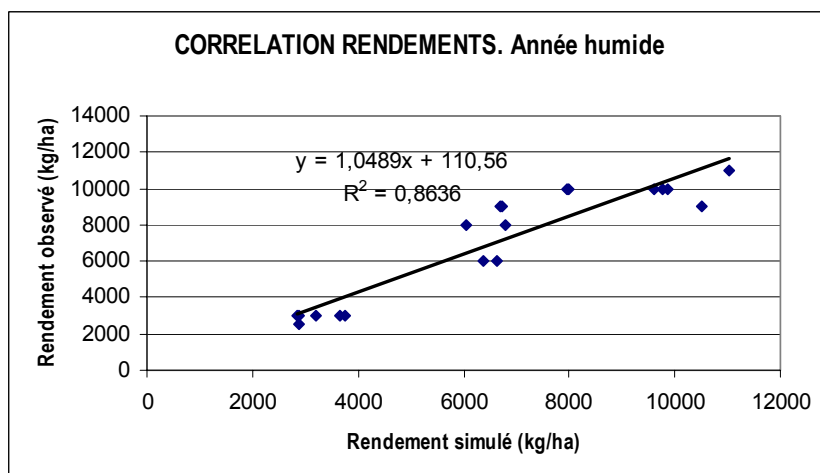
(1) K_{BT} = coefficient biomasse-transpiration ; (2) K_{LB} = efficience d'utilisation de la radiation ; (3) LAI = surface foliaire maximale

Une fois calibré, le modèle doit être **validé**, c'est-à-dire évalué sur un jeu de données réelles différentes des conditions optimales qui ont servi pour le paramétrage ; dans notre cas, nous avons comparé les rendements des cultures obtenues pour les années humides et sèches avec les rendements fournis par le groupe de pilotage.

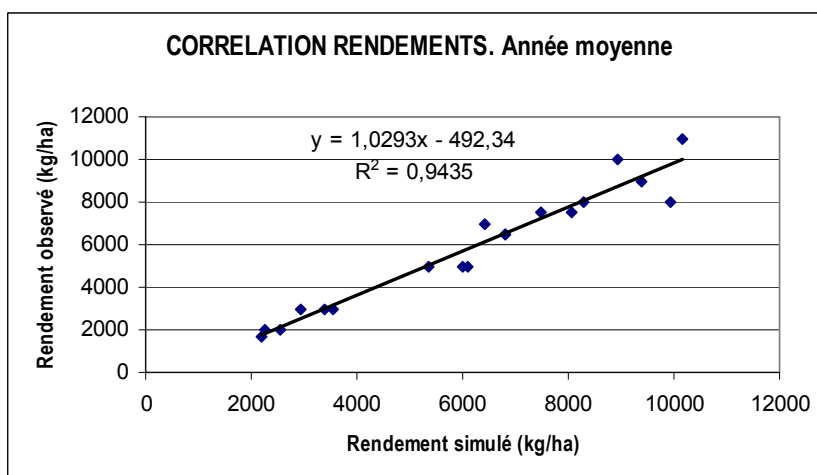
Si les valeurs simulées sont égales aux réelles, nous pouvons dire qu'il est bien calibré et qu'il représente bien notre système. Nous montrons ci-après la correspondance entre les rendements observés et ceux donnés par CropSyst dans les conditions réelles de culture :

Graphique 5: Corrélation entre rendements observés et ceux simulés par CropSyst pour les trois types d'année considérées : humide (5a), moyenne (5b) et sèche (5c)

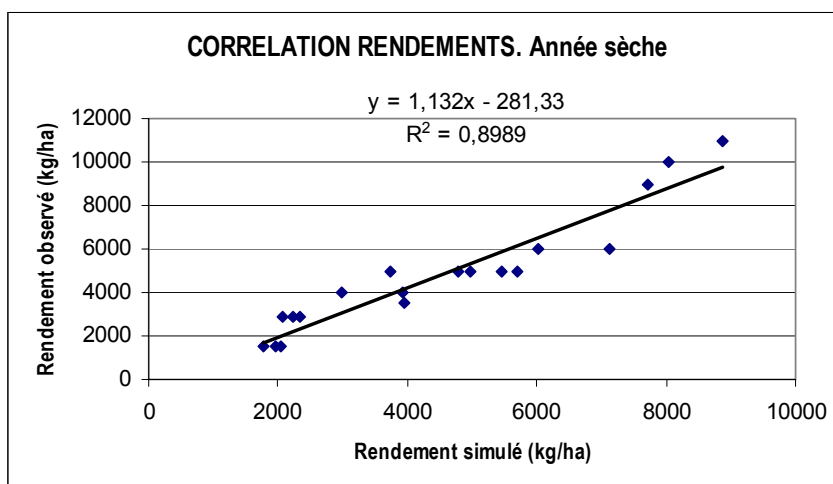
5a. Corrélation rendements simulés – rendements réels pour une année humide



5b. Corrélation rendements simulés – rendements réels pour une année moyenne



5c. Corrélation rendements simulés – rendements réels pour une année sèche



D'après les résultats montrés dans ces graphiques, nous pouvons noter que la corrélation de l'ensemble est acceptable avec des coefficients supérieures à 85% ; les valeurs de rendement que le modèle donne pour les années moyennes sont presque égales aux rendements réels, tandis que la corrélation la plus faible est celle correspondante aux années humides ($R^2 = 0,86$)

Simulations

Après le processus de calibrage et validation, nous avons un modèle qui reproduit bien la réalité. Il nous permet ainsi de réaliser un grand nombre de simulations pour tester différentes combinaisons de cultures, techniques, sols, années climatiques, etc. L'objectif de notre modèle bio-physique est de construire une base de données qui comprend les rendements et la lixiviation azotée produits par différents itinéraires techniques (volume d'irrigation et quantité d'azote appliqué) pour chaque culture pratiquée dans la zone d'étude. Cette base de données sera utilisée plus tard dans le modèle agro-économique Olympe.

Dans les simulations des cultures, nous avons voulu considérer l'influence des rotations sur les rendements et la lixiviation des nitrates, sachant que son effet ne pourra pas être introduit dans le modèle agro-économique dû au caractère statique de celui-ci et au manque des connaissances sur les rotations réelles pratiquées. Cependant, nous avons considéré qu'il est important de prendre en compte l'effet du reliquat d'azote dans les cultures, ce qui peut faire varier les rendements et la lixiviation pour une année donnée. Puisqu'on n'a pas de données sur les rotations réelles, on a simulé des monocultures pendant une période de 5 années et on a pris comme résultats les valeurs moyennes des deux dernières années, une fois que les conditions d'interculture sont devenues stables. Ces monocultures ont été simulées sur 5 années du même type (5 années humides, 5 années moyennes et 5 années sèches) dans le but d'obtenir les valeurs extrêmes possibles. Comme paramètres de sortie, on a retenu les doses d'azote et d'irrigation apportées, les rendements obtenus, la lixiviation et aussi le reliquat d'azote (stock), puisqu'on considère que ce paramètre constitue aussi un risque de lixiviation possible.

Pour une culture donnée, on va obtenir un tableau comme celui qu'on montre ci-après (tableau 16), qui rassemble, pour chaque type de sol et chaque type d'année, les dates de semis et de récolte, le rendement obtenu, les doses d'irrigation et de fertilisation, la quantité d'azote lixivié et la quantité d'azote qui reste dans le sol à la fin de la culture:

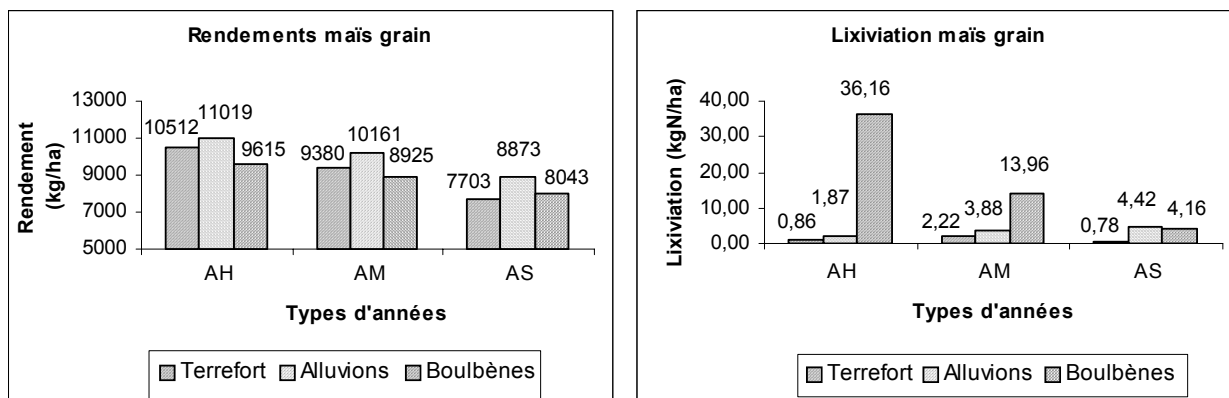
Tableau 16 : Données de sortie retenues des simulations pour la culture du maïs grain : date de semis, date de récolte, rendement (kg/ha), irrigation (mm), azote apporté (kg/ha) et azote lixivié (kg/ha) pour chaque type de sol et pour les trois années type considérées (année humide 1971, année moyenne 1975 et année sèche 1990). Les données d'entrée sont la date de semis et la dose d'irrigation et d'azote apportée d'après les fiches de culture fournies par le groupe de pilotage. La date de récolte, le rendement et la lixiviation ont été générés par le modèle.

MAIS GRAIN

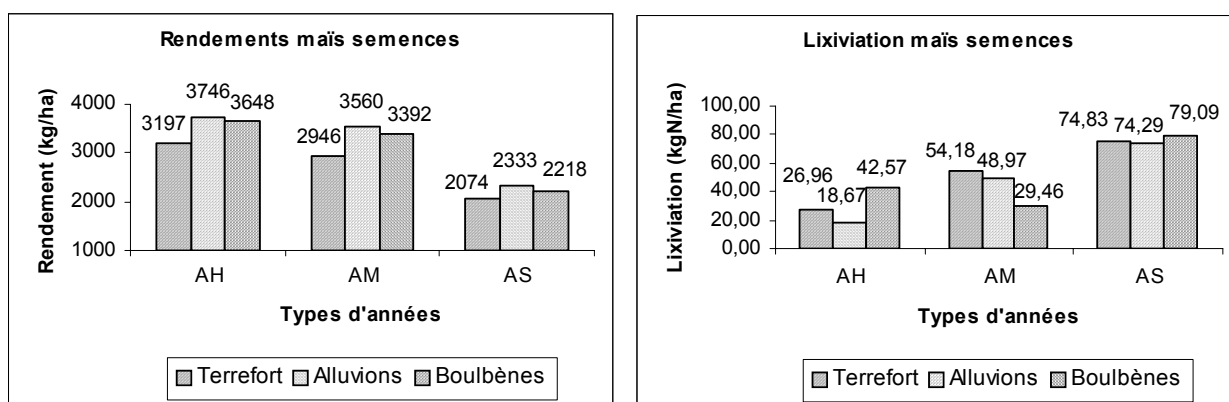
	Date de semis	Date de récolte	Type d'année	Rdmt (kg/ha)	Irrigation (mm)	N apporté (kg/ha)	N lixivié (kg/ha)	Stock N (kg/ha)
SOL 1 (Terrefort)	30-avr	01-nov	Hum	10512	70	200	0,86	18,82
	30-avr	12-nov	Moy	9380	140	200	2,22	21,89
	30-avr	03-oct	Sèch	7703	200	200	0,78	21,40
SOL 2 (Alluvions)	30-avr	03-nov	Hum	11019	90	200	1,87	20,89
	30-avr	13-nov	Moy	10161	200	200	3,88	21,57
	30-avr	04-oct	Sèch	8873	275	200	4,42	23,41
SOL 3 (Boulbènes)	30-avr	04-nov	Hum	9615	120	200	36,16	11,83
	30-avr	12-nov	Moy	8925	250	200	13,96	14,54
	30-avr	03-oct	Sèch	8043	400	200	4,16	16,42

D'après les valeurs obtenues des simulations, on peut comparer la lixiviation des nitrates et le stock azoté pour les différentes cultures dans chaque sol et chaque type d'année. Les rendements obtenus à partir des simulations et les quantités d'azote lixiviées pour chaque culture sont représentés dans l'annexe 5. Nous montrons l'exemple du maïs semence et du maïs grain dans les graphes suivants :

Graphique 6 : Valeurs des rendements (kg/ha) et lixiviation de nitrates (kgN/ha) résultat des simulations avec CropSyst pour le maïs grain, pour chaque type de sol et chaque type d'année.



Graphique 7 : Valeurs des rendements (kg/ha) et lixiviation de nitrates (kgN/ha) résultat des simulations avec CropSyst pour le maïs grain, pour chaque type de sol et chaque type d'année.



D'après les graphes montrés ci-dessus, nous pouvons voir que les rendements et la lixiviation des cultures (maïs grain et maïs semence) varient en fonction du type de sol et du type d'année. Pour le maïs grain, nous allons retrouver les valeurs de lixiviation les plus importantes pendant les années humides (à cause de l'excès d'eau dans le sol) et dans les sols de type boulbènes, tandis que pour le maïs semences, la lixiviation devient plus importante dans les années sèches, ce qui nous fait penser à l'existence d'un excès d'irrigation. Par rapport aux rendements, les plus importants apparaissent dans les années humides et les plus faibles dans les années sèches, pour le maïs grain comme pour le maïs semence. Ces rendements varient aussi avec le type de sol : ce sont les sols de type terrefort qui présentent les valeurs les plus élevées dans la plupart des cas, et les boulbènes les valeurs les plus basses. Cette hétérogénéité des résultats nous obligera à considérer toujours dans nos simulations futures les trois sols et les trois types d'année pour chaque culture.

III - Modèle agro-économique : Olympe⁵

Le logiciel Olympe va intégrer les aspects technique et économique du fonctionnement de l'exploitation. Il s'agit d'un simulateur pour l'aide à la décision dans l'orientation stratégique de l'exploitation agricole, à l'échelle individuelle, et /ou dans une démarche collective. L'intérêt d'Olympe se trouve dans sa rapidité à explorer différentes variantes qui permettent de tester la viabilité d'un projet. En effet, Olympe permet d'avoir :

- une base de données et la possibilité de création des variantes à partir d'un projet de base, ce qui constitue sa fonctionnalité probablement la plus importante,
- l'évaluation des conséquences d'un nouvel investissement, de la suppression ou de l'ajout d'un atelier de production, d'un changement d'un calendrier cultural, d'un changement de technique...
- l'intégration dans la simulation des risques et l'évaluation des conséquences des événements possibles, qu'on appelle aléas, qui peuvent être intérieurs ou extérieurs à l'entreprise, sur les résultats du projet (évolution des prix, aléas climatiques, évolutions des marchés).

L'utilisation d'Olympe comme outil de simulation est adaptée à l'échelle régionale en raison de sa capacité de représentation des ensembles des exploitations. En effet, il permet une modélisation agrégée des systèmes agricoles dans une approche globale au niveau du territoire. Le simulateur agit comme un révélateur de l'impact des changements des cultures ou des techniques mais ne permet pas de représenter les stratégies et les comportements des différents acteurs en jeu. Pour modéliser le fonctionnement complet du système, il est impératif de comprendre et de formaliser les règles de décision des acteurs ainsi que les lois qui régissent ces règles. Olympe a été développé dans le cadre d'une réflexion pour une nouvelle approche du conseil dans laquelle l'agriculteur va intervenir d'une façon active, ce qui exige au simulateur de satisfaire deux conditions principales (Fendri, 2002) :

- ❑ Son utilisation doit être simple et rapide, compatible avec les contraintes du conseil en agriculture.
- ❑ Il doit reposer sur une représentation du fonctionnement de l'entreprise proche de celle que s'en font les décideurs, avec des procédures qui aient un sens du point de vue de leurs propres logiques décisionnelles.

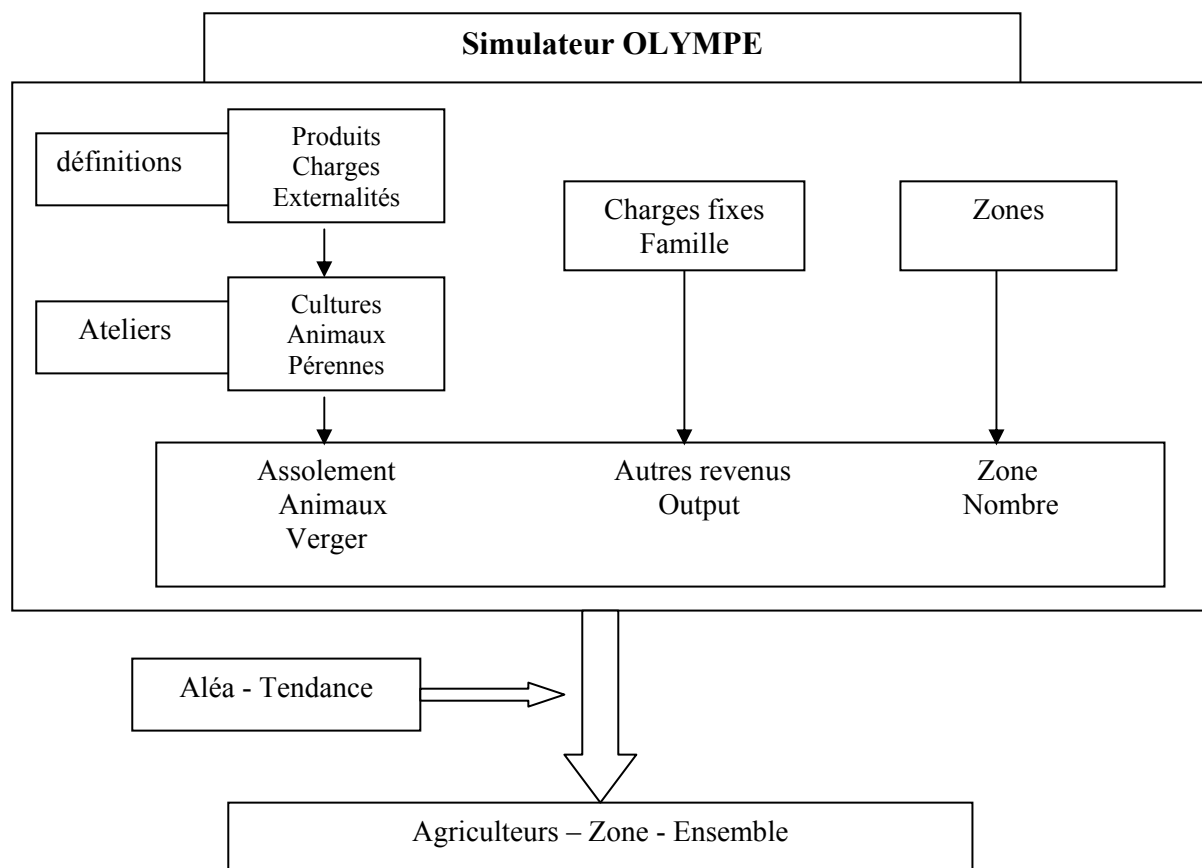
La modélisation sur Olympe permet de prévoir les conséquences des différents scénarios envisagés par l'exploitant ou les experts. Ainsi « l'utilisation d'un modèle qui simule les conséquences de certains aspects de ses raisonnements de gestion le met en situation d'apprentissage et de modification/confirmation de ses règles de décision, dont il peut apprécier la pertinence au regard de ses projets et du devenir de l'entreprise qu'il perçoit » (*Attonaty et Soler, 1991*).

Description d'Olympe

Le modèle est à la fois une base de données sur les systèmes de production et un outil de prospective sur les futurs possibles. Nous utilisons le modèle comme révélateur des conséquences des changements possibles, ce qui nous permettra d'établir un dialogue avec l'agriculteur dans la démarche d'un pilotage stratégique. Il est composé de différentes parties qui s'enchaînent et s'articulent dans une logique de dépendance. Le programme s'organise comme suit :

⁵ Modèle développé par Jean-Marie Attonaty, INRA ESR Paris-Grignon

Figure 7 : Schéma qui représente l'organisation du simulateur Olympe et l'enchaînement entre les différentes rubriques



A. Définitions

Nous devons définir ici les produits que nous pouvons obtenir des cultures, avec ses prix, et les charges liées à la production, ainsi que les charges de structure possibles. Ces valeurs vont servir après à élaborer les fiches technico-économiques de chaque culture.

B. Ateliers

Cette rubrique inclut quatre groupes d'activités, pour lesquels il faudra remplir les fiches technico-économiques : cultures, pérennes, animaux et pluriannuelles. Pour chacune d'entre elles, nous devons préciser les intrants utilisés et les produits obtenus. Nous avons la possibilité d'introduire ici les externalités liées à la production, dans notre cas, ce sera la lixiviation des nitrates calculée par CropSyst.

C. Agriculteurs

Après avoir défini les ateliers, l'étape suivante consiste à définir l'assolement spécifique à chaque exploitation. Nous allons remplir une fiche pour une exploitation représentative de chaque groupe de la typologie, exploitation que nous avons choisie selon des critères de taille : nous allons considérer comme exploitation représentative d'une typologie l'exploitation appartenant à cette typologie dont la superficie est la plus proche de la superficie moyenne du groupe.

D. Ensembles

Cette rubrique nous permet de regrouper les exploitations saisies suivant différents critères. C'est ici que les exploitations seront agrégées par classe et par zone, en utilisant des coefficients de pondération qui

multiplient les données d'une exploitation individuelle par le nombre total des exploitations qu'elle représente.

E. Aléas

Nous pouvons définir des aléas (évolutions) sur les prix et sur les quantités des produits ou des charges, ou des externalités, ce qui nous permettra après d'évaluer les résultats des changements futurs. Ces aléas peuvent être introduits sous forme de :

- tendance : pourcentage d'évolution annuelle par rapport à la valeur de base
- scénario : définition des types d'années dont leurs valeurs sont exprimées aussi en pourcentage par rapport à la valeur de base ; les types d'années seront choisis ultérieurement, au moment de définition de la simulation

Données nécessaires

Pour la construction du modèle, on s'est appuyé principalement sur les données provenant des déclarations d'assolements des agriculteurs, où ils précisent les intrants utilisés et les produits obtenus pour une partie des cultures de la zone (celles qui occupent la majorité de la surface). Pour le reste des cultures pour lesquelles on n'avait pas de données, on a créé des fiches moyennes, c'est-à-dire qu'on a considéré des quantités moyennes d'intrants et de produits par groupes de culture (maraîchage, céréales irriguées et non irrigués, fruitiers d'été et d'hiver). Les valeurs des prix des produits ont été fournies localement. Pour les valeurs des primes, on s'est basé sur l'Agenda 2000, c'est-à-dire sur les références données par le Ministère de l'Agriculture et de la Pêche pour le département du Tarn-et-Garonne. Pour les externalités, nous avons introduit pour chaque culture les valeurs d'azote lixivié calculées par le modèle bio-physique CropSyst (simulations individuelles, sans prendre en compte les rotations). Quant à la production de nitrates provenant de l'élevage, nous avons considéré comme valeurs de référence les valeurs présentées ci-dessous :

Tableau 17: Azote produit par les différents types d'élevage (kg N / tête*an)

Production d'azote (kg/tête*an)	
Vache lait	90
Vache allaitante	73
Bovins > 2 ans	73
Bovins < 6 mois	10
Génisse 6 – 12 mois	25,5
Truie avec porcelet	30
Porc charcutier	12
Ovin et caprin < 1 an	3,3
Ovin et caprin > 1 an	6,6
Equin	56
Poulet chair	0,27
Poule pondeuse reproductrice	0,62
Lapine mère	3,6
Dinde	0,81
Oie	0,43
Canard	0,43
Pintade	0,27

Source : rennes.inra.fr/umrsas

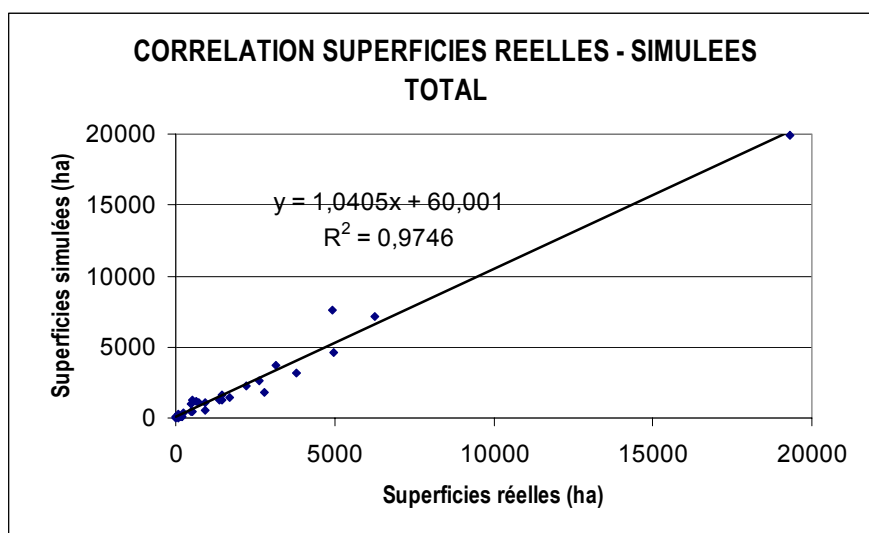
Nous avons comparé d'abord les surfaces totales pour chaque culture, ensuite les valeurs agrégées par zone et par classe de production, comparaisons qui sont synthétisées dans les tableaux ci-dessous.

Tableau 18 : Calage du modèle Olympe : comparaison entre les superficies de chaque culture obtenues dans le modèle et les valeurs réelles obtenues à partir des enquêtes (en ha)

CULTURES	SUPERFICIE (ha)	
	Enquêtes	Olympe
Blé dur	504	980
Blé tendre	4978	4584
Maïs grain/ensilage	6251	7136
Maïs semences	1470	1651
Sorgho sec	510	1279
Sorgho irrigué	627	1205
Tournesol sec	3146	3682
Tournesol irrigué	182	122
Autres céréales NI	1356	1282
Autres céréales I	3	96
Alim animale NI	3806	3137
Alim animale I	942	1092
PDT consom. I	0	0
Autres oléag NI	733	1094
Autres oléag I	929	502
Semences hors maïs	537	444
Prairies NI	19307	19885
Prairies I	247	317
C.Fourragères NI	171	51
C.Fourragères I	68	313
C.Maraichères	1697	1429
Vignes	505	445
Pommier	1466	1263
Arbo	2227	2223
Terres non cultivées	4931	7632
Landes/Friche N Patur	2796	1831
Bois et Taillis	2639	2593
Autres cultures	64	19

On a représenté la corrélation entre les valeurs des surfaces réelles pour chaque culture et celles sorties du modèle Olympe dans un graphique qu'on montre ci-après :

Graphique 8 : Représentation de la corrélation entre les superficies de chaque culture au niveau du bassin résultant du modèle Olympe et celles observées dans la réalité, à partir des enquêtes (déclarations d'assolement 2000)



Nous pouvons voir que le modèle représente bien la répartition des cultures au niveau de l'ensemble du bassin, avec un coefficient de corrélation entre les valeurs réelles et les simulées de 0,97. Néanmoins, cela ne suffit pas pour savoir si la typologie représente bien la réalité, il nous faut aussi comparer les valeurs des surfaces par zone et par classe de production.

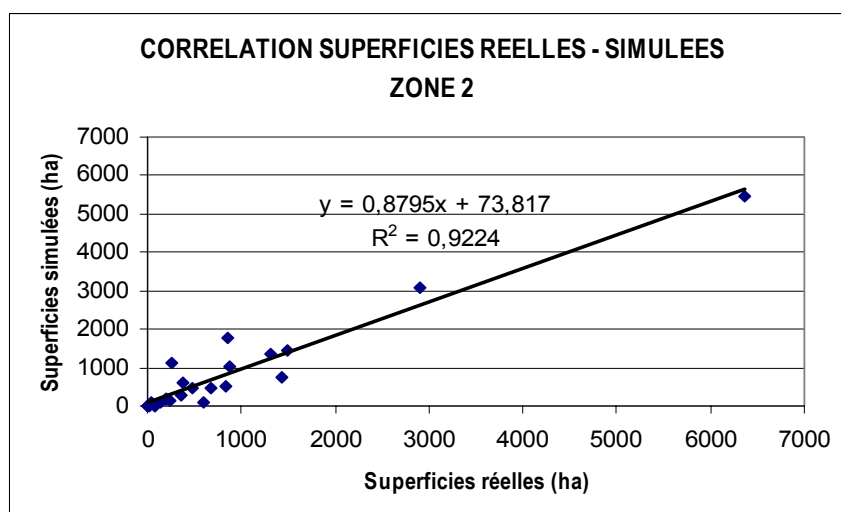
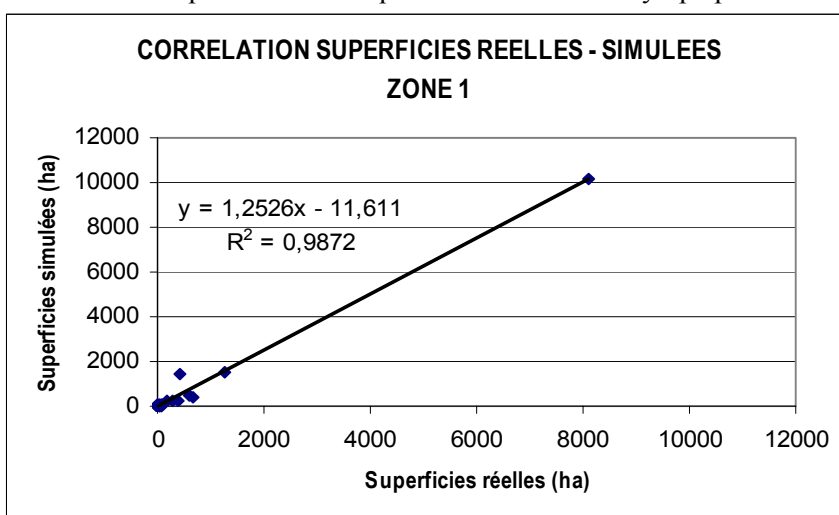
- **Calage par zone**

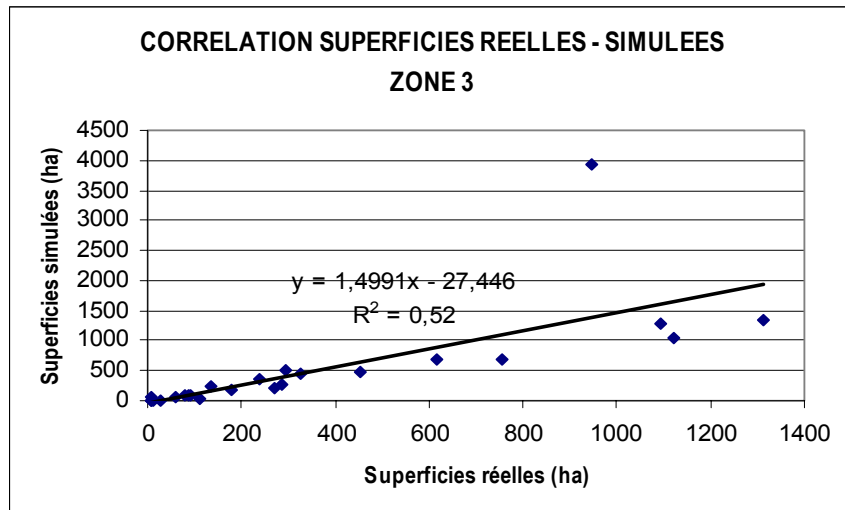
Le tableau ci-dessous présente la corrélation entre les surfaces pour chaque groupe de cultures par zone. Les coefficients de corrélation obtenus sont en général satisfaisants, proches de l'unité sauf pour la zone 3, où il présente une valeur de 0,52. Cette valeur est due au décalage entre la superficie de terres non cultivées réelle et simulée, sans laquelle le coefficient de corrélation deviendrait égale à 0,96 ; on a considéré que ce décalage n'avait pas une influence importante sur notre étude.

Graphique 9 : Comparaison entre les superficies occupées par chaque culture (ha) montrées par les enquêtes (déclarations d'assolement 2000) et par le modèle agrégé Olympe, par zone :

9 A. Comparaison entre les superficies des enquêtes et du modèle Olympe pour la zone 1 (Causses)

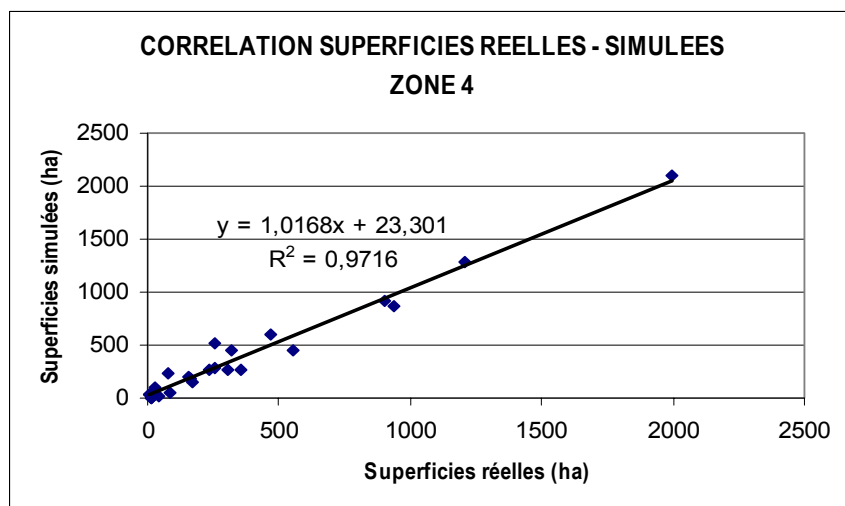
9 B. Comparaison entre les superficies des enquêtes et du modèle Olympe pour la zone 2 (Quercy blanc)



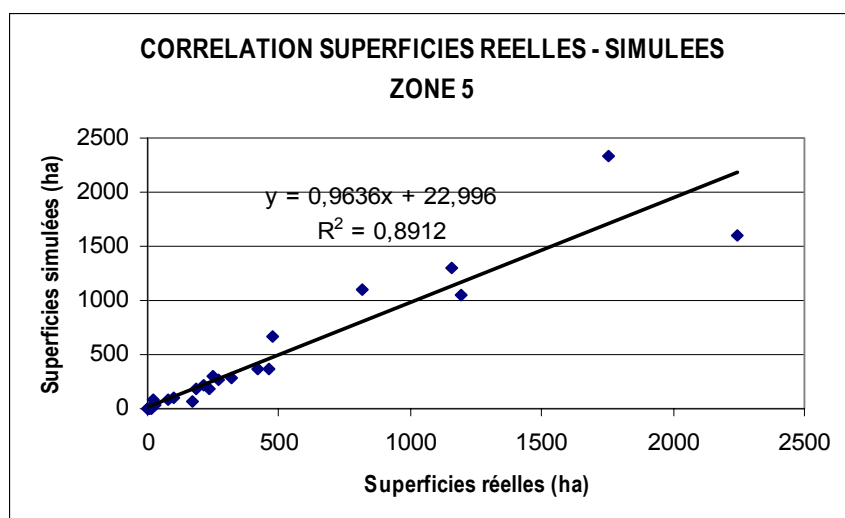


9 C. Comparaison entre les superficies des enquêtes et du modèle Olympe pour la zone 3 (alluvions)

9 D. Comparaison entre les superficies des enquêtes et du modèle Olympe pour la zone 4 (boulbènes)



9 E. Comparaison entre les superficies des enquêtes et du modèle Olympe pour la zone 5 (Quercy vert)



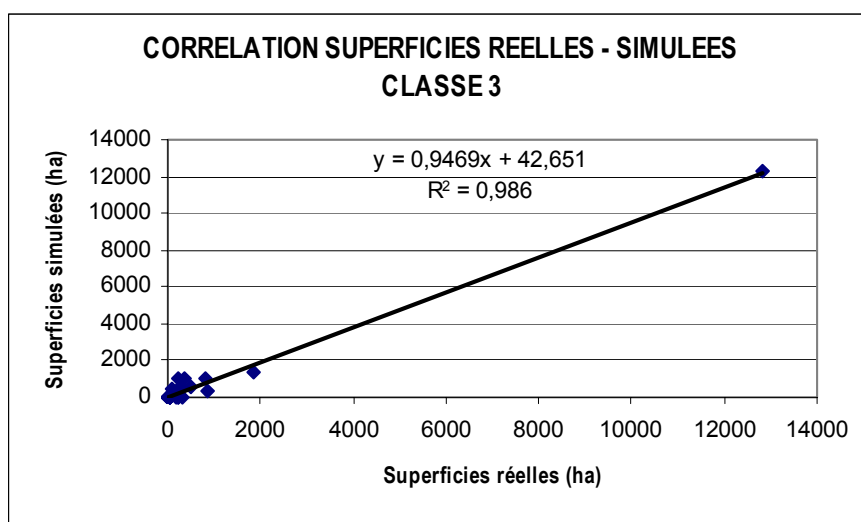
Comme pour le calage au niveau régional, dans le cas des surfaces par zone, le modèle répond correctement à la réalité d'après les résultats obtenus. Il ne nous reste qu'à comparer les surfaces des cultures par classe de production :

- **Calage par classe**

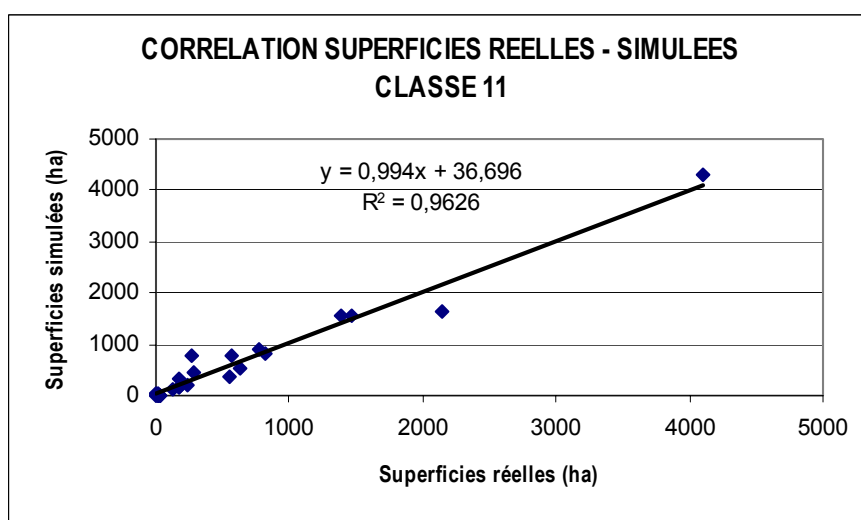
On a comparé aussi les surfaces de chaque culture par classe de production de la typologie, dont les corrélations sont représentées dans des graphiques similaires à ceux utilisés ci-dessus pour le calage par zone. Nous montrons les résultats obtenus pour le calage des trois classes les plus représentées : bovin viande, polyculture diversifiée et bovin lait. Pour le reste des classes de production, voir annexe 6. Nous constatons que les coefficients de corrélation sont assez proches de l'unité, ce qui affirme que le modèle Olympe répond bien à la réalité en ce qui concerne les surfaces des cultures par zone, par classe et totales.

Graphique 10 : Comparaison entre les superficies occupées par chaque culture (ha) d'après les déclarations d'assolement et d'après le modèle agrégé Olympe par classes de production : nous montrons comme exemple les classes 3 (vaches allaitantes), 11 (polyculture) et 1 (vaches laitières) :

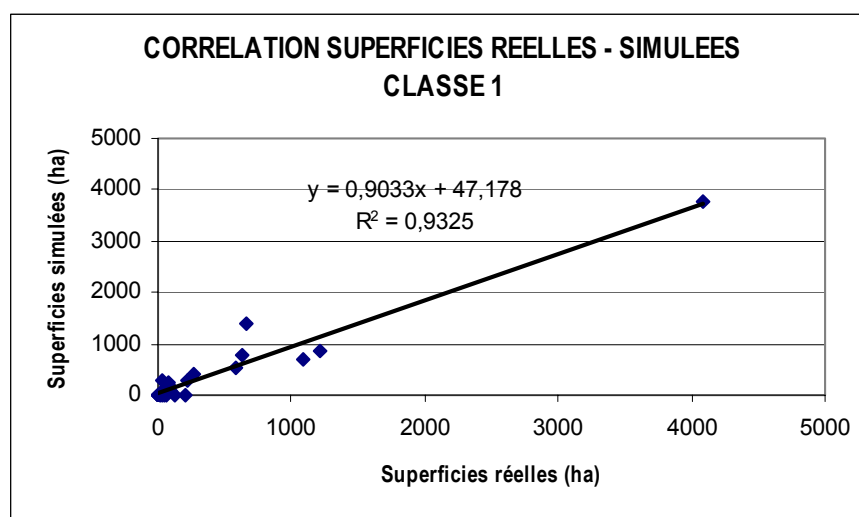
10 A. Comparaison entre superficies des enquêtes et du modèle Olympe pour la classe 3 (bovin viande)



10 B. Comparaison entre superficies des enquêtes et du modèle Olympe pour la classe 11 (polyculture)



10 C. Comparaison entre superficies des enquêtes et du modèle Olympe pour la classe 1 (bovin lait)



Résultats du modèle

Une fois validé, le modèle nous permet d'obtenir comme données de sortie des valeurs agrégées par zone et par classe de production. Notre analyse va être focalisée sur les paramètres liés à la consommation d'eau et à la lixiviation ainsi que les effets des possibles changements sur les marges. La marge donnée par le modèle Olympe correspond à celle provenant des cultures, par contre, l'élevage n'y est pas compris. Sa marge sera utile dans la comparaison des efficacités des systèmes de culture entre les différents groupes et dans la recherche des nouvelles façons d'organiser ces cultures.

Les tableaux suivants montrent les valeurs agrégées, par zone et par classe de production, de la consommation d'eau, de la consommation d'azote, de la lixiviation d'azote et de la marge :

1. Valeurs agrégées par zone

Tableau 19: Sorties du modèle Olympe : valeurs agrégées de la consommation d'eau totale et consommation d'eau par ha irriguée dans chaque zone.

	EAU (m3)			EAU (m3/ha)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
Z1: Causses	829173	587504	308820	2182,03	1546,06	812,68
Z2: Quercy blanc	11617500	7359047	3741352	2010,64	1273,63	647,52
Z3: Alluvions	13189860	7749610	4042396	3304,07	1941,29	1012,62
Z4: Boulbènes	19007140	12392170	6484734	4063,96	2649,60	1386,52
Z5: Quercy vert	6883137	4599414	2506037	2282,21	1525,00	830,91
TOTAL	51526830	32687740	17083340	2887,79	1831,96	957,43

Tableau 20 : Sorties du modèle Olympe : valeurs agrégées de la consommation d'azote totale et consommation d'azote par ha dans chaque zone

	AZOTE (kg)			AZOTE (kg/ha)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
Z1: Causses	483651	483651	483651	32,02	32,02	32,02
Z2: Quercy blanc	1686850	1686850	1686850	87,92	87,92	87,92
Z3: Alluvions	854785	854785	854785	94,14	94,14	94,14
Z4: Boulbènes	957949	957949	957949	103,09	103,09	103,09
Z5: Quercy vert	1057660	1057660	1057660	99,78	99,78	99,78
TOTAL	5040895	5040895	5040895	79,68	79,68	79,68

Tableau 21 : Sorties du modèle Olympe : valeurs agrégées de la lixiviation totale et lixiviation par ha dans chaque zone

	LIXIVIATION (kgN)			LIXIVIATION (kgN/ha)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
Z1: Causses	2154	8435	15245	0,14	0,56	1,01
Z2: Quercy blanc	42196	57982	73829	2,20	3,02	3,85
Z3: Alluvions	42261	40237	51670	4,65	4,43	5,69
Z4: Boulbènes	56331	74730	194740	6,06	8,04	20,96
Z5: Quercy vert	35892	37697	54753	3,39	3,56	5,17
TOTAL	178832	219080	390238	2,83	3,46	6,17

Tableau 22 : Sorties du modèle Olympe: valeurs agrégées du stock d'azote total et du stock par ha dans chaque zone

	STOCK AZOTE (kgN)			STOCK AZOTE (kgN/ha)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
Z1: Causses	32806	20798	19209	2,17	1,38	1,27
Z2: Quercy blanc	223592	178671	152013	11,65	9,31	7,92
Z3: Alluvions	97922	87723	83330	10,78	9,66	9,18
Z4: Boulbènes	64766	71618	48573	6,97	7,71	5,23
Z5: Quercy vert	286157	109072	90857	27,00	10,29	8,57
TOTAL	705242	467882	393982	11,15	7,40	6,23

Tableau 23 : Sorties du modèle Olympe: valeurs agrégées de la marge brute totale et marge brute par ha dans chaque zone

	MARGE (F)			MARGE (F/ha)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
Z1: Causses	26500240	28832590	29585730	1754,63	1909,06	1958,93
Z2: Quercy blanc	84715920	115453800	135613900	4415,28	6017,29	7068,01
Z3: Alluvions	63363120	79236820	92030800	6978,32	8726,52	10135,55
Z4: Boulbènes	26266050	37600820	42233540	2826,74	4046,58	4545,15
Z5: Quercy vert	35924510	47851660	55109000	3389,10	4514,31	5198,96
TOTAL	236769800	308975600	354573000	3742,69	4884,06	5604,83

Ces tableaux nous permettent d'avoir une vision sur l'ordre de grandeur des paramètres choisis dans la région ainsi que sur leur distribution dans les zones. Nous pouvons constater que la zone de boulbènes est celle avec la consommation d'eau la plus importante, tant en valeur absolue qu'en valeur par ha et par ha

irriguée, suivie de la zone d'alluvions. La zone boulbènes présente aussi les valeurs de lixiviation les plus importantes, atteignant à elle seule des valeurs de l'ordre de 50% de la lixiviation totale du bassin dans les années humides (rappelons que la superficie de cette zone représente 15% de la superficie totale de la région et sa superficie irriguée, 26% de la superficie irriguée totale). Toutefois, les écarts dans les valeurs de lixiviation entre les zones ne sont pas liés aux différents niveaux d'application de l'azote, puisque ceux-ci sont très proches pour toutes les zones sauf les Causses calcaires, où l'élevage a un rôle plus important.

Par rapport à la marge, la zone 3 (alluvions) montre la marge par unité de superficie la plus haute, suivie de la zone 2 (Quercy blanc). Après les Causses, où le poids des cultures dans la marge est moins important (importance de l'élevage), la marge la plus basse se trouve dans les boulbènes, là où les niveaux de consommation d'eau et de la lixiviation étaient les plus hauts.

Toutes ces réflexions nous serviront plus tard dans la création des nouveaux scénarios pour la recherche de solutions possibles. Analysons la situation par classe de production.

1. Valeurs agrégées par classe de production

Tableau 24 : Sorties du modèle : valeurs agrégées de la consommation d'eau totale, volume consommé par ha et volume consommé par ha irrigué, par classe de production et par type d'année

	CONSOMMATION EAU (m3)			CONSOM. EAU (m3/ha irriguée)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
CL 1: bovin lait	7105761	4657488	2398688	2296,63	1505,33	775,27
CL 2: volaille	178965	141378	71350	2057,07	1625,03	820,11
CL 3: bovin viande	4798455	3095214	1558667	2694,25	1737,91	875,16
CL 4: céréal irrigué	201703	131789	75299	1483,11	969,04	553,67
CL 5: maïs sem	4477876	2768427	1315053	2472,60	1528,67	726,15
CL 6: porcin	309624	204111	103756	3192,00	2104,24	1069,65
CL 7: grandes cult	11764010	7638894	3862853	3765,69	2445,23	1236,51
CL 8_1	257531	176412	105202	2524,81	1729,53	1031,39
CL 8_2	994820	645081	343036	2960,77	1919,88	1020,94
CL 8: oléag non irr	1252351	821493	448238	2859,25	1875,55	1023,37
CL 9: maraîchage	1177835	934452	605631	2332,35	1850,40	1199,27
CL 10: vigne	810944	516213	247999	2607,54	1659,85	797,42
CL 11_arbo	3702249	2045427	1000310	2594,43	1433,38	700,99
CL 11_lait	100226	71757	44208	1728,03	1237,19	762,21
CL 11_NI	7656	5280	3224	2552,00	1760,00	1074,67
CL 11_poly I	2050838	1409132	810019	2271,14	1560,50	897,03
CL 11_porc	154133	106001	64444	2055,11	1413,35	859,25
CL 11_sem	1166505	777660	443826	2370,95	1580,61	902,09
CL 11_v viande	752199	509699	292003	2225,44	1507,99	863,91
CL 11_volail	1547588	1054723	626887	2362,73	1610,26	957,08
CL 11: polyculture	9481394	5979679	3284921	2399,75	1513,46	831,42
CL 12: arboricult	9286289	5174088	2990601	3536,29	1970,33	1138,84

Les classes sont celles définies dans le tableau 8 (voir description de la typologie, page 40)

Tableau 25 : Sorties du modèle : valeurs agrégées de la consommation d'azote totale, par classe de production et par type d'année

	CONSUMMATION AZOTE (kg)			CONSOM. AZOTE (kg/ha)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
CL 1: bovin lait	838719	838719	838719	89,32	89,32	89,32
CL 2: volaille	61395	61395	61395	64,53	64,53	64,53
CL 3: bovin viande	785013	785013	785013	42,65	42,65	42,65
CL 4: cérééal irrigué	24235	24235	24235	129,41	129,41	129,41
CL 5: maïs sem	338249	338249	338249	112,48	112,48	112,48
CL 6: porcin	38757	38757	38757	121,10	121,10	121,10
CL 7: grandes cult	593979	593979	593979	121,52	121,52	121,52
CL 8_1	74502	74502	74502	68,27	68,27	68,27
CL 8_2	213579	213579	213579	83,55	83,55	83,55
CL 8: oléag non irr	288081	288081	288081	78,98	78,98	78,98
CL 9: maraîchage	45458	45458	45458	64,12	64,12	64,12
CL 10: vigne	72639	72639	72639	80,85	80,85	80,85
CL 11_arbo	373058	373058	373058	114,80	114,80	114,80
CL 11_lait	23181	23181	23181	88,81	88,81	88,81
CL 11_NI	149969	149969	149969	73,21	73,21	73,21
CL 11_poly I	483691	483691	483691	85,37	85,37	85,37
CL 11_porc	37308	37308	37308	144,09	144,09	144,09
CL 11_sem	138707	138707	138707	111,57	111,57	111,57
CL 11_v viande	151230	151230	151230	96,47	96,47	96,47
CL 11_volail	184458	184458	184458	185,19	185,19	185,19
CL 11: polyculture	1541602	1541602	1541602	100,82	100,82	100,82
CL 12: arboricult	382597	382597	382597	74,69	74,69	74,69

Tableau 26 : Sorties du modèle : valeurs agrégées de la lixiviation totale et lixiviation par unité de superficie, par classe de production et par type d'année

	LIXIVIATION (kgN)			LIXIVIATION (kgN/ha)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
CL 1: bovin lait	45620	48474	54361	4,86	5,16	5,79
CL 2: volaille	3576	3978	5650	3,76	4,18	5,94
CL 3: bovin viande	20422	26167	39077	1,11	1,42	2,12
CL 4: cérééal irrigué	1929	3127	4474	10,30	16,70	23,89
CL 5: maïs sem	73481	46327	40231	24,43	15,41	13,38
CL 6: porcin	1505	2259	3592	4,70	7,06	11,22
CL 7: grandes cult	10905	26367	61323	2,23	5,39	12,55
CL 8_1	477	1503	4382	0,44	1,38	4,02
CL 8_2	9255	10678	23557	3,62	4,18	9,21
CL 8: oléag non irr	9732	12181	27939	2,67	3,34	7,66
CL 9: maraîchage	687	1278	2979	0,97	1,80	4,20
CL 10: vigne	7388	6113	6311	8,22	6,80	7,02
CL 11_arbo	3942	11483	31933	1,21	3,53	9,83
CL 11_lait	77	473	900	0,30	1,81	3,45
CL 11_NI	1194	6398	16865	0,58	3,12	8,23
CL 11_poly I	7566	14178	38629	1,34	2,50	6,82
CL 11_porc	1857	1892	1966	7,17	7,31	7,59
CL 11_sem	13196	11795	14208	10,61	9,49	11,43
CL 11_v viande	4168	7595	16333	2,66	4,84	10,42
CL 11_volail	2843	4684	9929	2,85	4,70	9,97
CL 11: polyculture	34843	58498	130763	2,28	3,83	8,55
CL 12: arboricult	1912	5255	14679	0,37	1,03	2,87

Tableau 27 : Sorties du modèle : valeurs agrégées du stock d'azote total et du stock par unité de superficie, par classe de production et par type d'année

	STOCK AZOTE (kgN)			STOCK AZOTE (kgN/ha)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
CL 1: bovin lait	81944	71345	56690	8,73	7,60	6,04
CL 2: volaille	2839	1909	1508	2,98	2,01	1,59
CL 3: bovin viande	66781	58349	53603	3,63	3,17	2,91
CL 4: cérééal irrigué	3179	2848	2695	16,98	15,21	14,39
CL 5: maïs sem	100363	82315	57847	33,37	27,37	19,24
CL 6: porcin	1888	1722	1575	5,90	5,38	4,92
CL 7: grandes cult	58193	53953	46480	11,91	11,04	9,51
CL 8_1	8863	7284	7945	8,12	6,68	7,28
CL 8_2	58635	19721	17638	22,94	7,71	6,90
CL 8: oléag non irr	67498	27005	25583	18,50	7,40	7,01
CL 9: maraîchage	4334	1804	1962	6,11	2,54	2,77
CL 10: vigne	15488	12239	7835	17,24	13,62	8,72
CL 11_arbo	48510	23984	23921	14,93	7,38	7,36
CL 11_lait	1167	1002	952	4,47	3,84	3,65
CL 11_NI	21498	12805	13421	10,49	6,25	6,55
CL 11_poly I	103125	30613	30877	18,20	5,40	5,45
CL 11_porc	31	31	33	0,12	0,12	0,13
CL 11_sem	59221	23833	16908	47,64	19,17	13,60
CL 11_v viande	11689	8462	7326	7,46	5,40	4,67
CL 11_volail	6635	5414	5111	6,66	5,44	5,13
CL 11: polyculture	251876	106144	98549	16,47	6,94	6,44
CL 12: arboricult	6438	5503	4966	1,26	1,07	0,97

Tableau 28 : Sorties du modèle : valeurs agrégées de la marge totale et marge par unité de superficie, par classe de production et par type d'année

	MARGE (kF)			MARGE (F/ha)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
CL 1: bovin lait	26717,9	32704,1	36245,1	2845,45	3482,97	3860,09
CL 2: volaille	2392,7	2611,9	2684,1	2515,07	2745,46	2821,29
CL 3: bovin viande	39410,5	45642,0	48930,2	2141,10	2479,65	2658,29
CL 4: cérééal irrigué	858,8	1144,3	1281,0	4585,82	6110,34	6840,32
CL 5: maïs sem	16200,8	26277,3	29496,5	5387,27	8738,03	9808,49
CL 6: porcin	900,1	1149,0	1310,5	2812,34	3589,98	4094,77
CL 7: grandes cult	14010,4	19302,2	23263,2	2866,42	3949,08	4759,49
CL 8_1	6797,5	8070,8	9947,2	6229,25	7396,14	9115,71
CL 8_2	8371,5	10429,6	11673,2	3274,69	4079,77	4566,22
CL 8: oléag non irr	15169,0	18500,5	21620,5	4158,56	5071,88	5927,23
CL 9: maraîchage	10775,8	11956,1	13040,9	15198,86	16863,50	18393,69
CL 10: vigne	6020,0	7897,8	9047,9	6700,55	8790,52	10070,66
CL 11_arbo	26263,1	35349,1	42779,1	8081,63	10877,54	13163,91
CL 11_lait	799,2	968,4	1034,4	3061,76	3710,08	3962,93
CL 11_NI	3935,9	5466,0	5681,8	1921,40	2668,33	2773,70
CL 11_poly I	13970,0	17800,0	19471,0	2465,62	3141,60	3436,51
CL 11_porc	815,5	866,4	912,9	3149,45	3346,11	3525,54
CL 11_sem	7009,7	9501,2	10741,2	5638,42	7642,51	8639,95
CL 11_v viande	6100,3	7666,7	8298,3	3891,37	4890,63	5293,48
CL 11_volail	5209,7	6217,4	6746,2	5230,42	6242,08	6773,01
CL 11: polyculture	64103,3	83835,1	95664,8	4192,24	5482,67	6256,31
CL 12: arboricult	41347,6	55132,7	68355,8	8071,73	10762,80	13344,18

Rappelons que les données obtenues pour les marges et la lixiviation ne sont pas des valeurs totales. En effet, les marges ne tiennent pas compte de l'activité élevage, mais uniquement des cultures (même pour les classes d'éleveurs les valeurs des marges ne correspondent qu'à la marge due aux cultures qu'ils pratiquent) et la lixiviation comprend l'azote lixivié dans les cultures qui ont été simulées dans CropSyst : blé dur, blé tendre, sorgho sec et irrigué, tournesol sec et irrigué, maïs grain/ensilage et maïs semence.

A partir de l'analyse de ces données, nous allons (i) établir des scénarios afin de réduire la consommation d'eau et la pollution dans le bassin versant et (ii) simuler de nouveaux scénarios et comparer les résultats de ces simulations avec les valeurs initiales.

IV - Couplage modèle bio-physique et modèle agro-économique

L'utilisation de la méthode de couplage de modèles permet de tenir compte du caractère très complexe de certaines relations entre la production agricole et ses impacts environnementaux (Flichman et Jacquet, 2000). L'utilisation des modèles agronomiques comme source d'information pour estimer les fonctions de production y compris la production des externalités, permet d'introduire un niveau de finesse et de précision impossible à atteindre par d'autres moyens. Les premiers travaux utilisant le couplage de modèles ont été élaborés dans le cadre de la modélisation bio-économique « classique » ; mais ce type de modèles s'adapte mal en économie agricole pour évaluer les impacts des activités sur l'environnement, parce qu'il s'agit de modèles normatifs, qui ne suffisent pas dans l'aide à la décision, et ne reproduisent pas le comportement des acteurs.

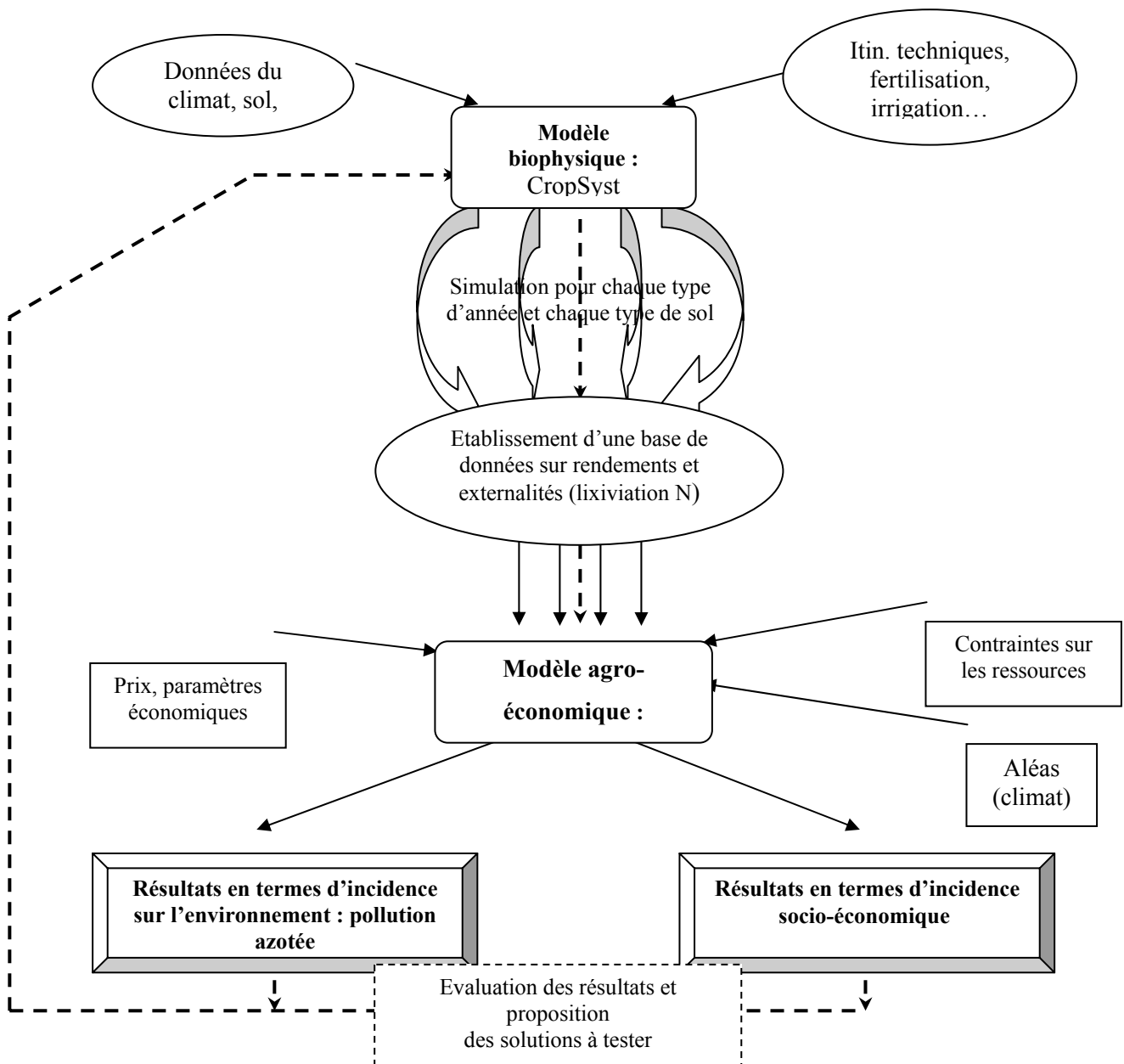
Dans les années 1970 commencent à être élaborés des modèles agronomiques de croissance de plantes (Flichman et Jacquet, 2001), les premiers pour une seule espèce, dont les plus connus sont la famille des modèles CERES (Jones et al 1986) ; plus tard, ils ont permis de simuler la croissance de multiples cultures, en incorporant de manière dynamique les effets cumulatifs de la production agricole. C'est par exemple le cas de CropSyst. L'utilisation de ces modèles comme source d'information commence à se développer aux Etats-Unis ; les recherches initiales ont porté sur le problème de l'érosion des sols et ses effets concernant la productivité agricole à long terme, et plus tard sur la pollution diffuse d'origine agricole, aussi bien provoquée par les nitrates que par les pesticides.

Le modèle sectoriel américain construit par Atwood, J, McCarl, B et al (2000) utilise les résultats des simulations réalisées pour obtenir les impacts environnementaux des choix agricoles à l'échelle d'un bassin versant. En Europe, l'idée de couplage des modèles agronomiques et économiques est proposée par Flichman (1986) et par Jacquet et Flichman (1988) La première application est une étude sur les comparaisons internationales d'efficacité en agriculture ; quelques années plus tard, un projet européen a été développé pour analyser les effets de la réforme de la PAC du point de vue des changements des revenus, des variations de la production, des impacts sur l'irrigation et sur la pollution potentielle produite par la percolation des nitrates.

Plusieurs travaux ont été développés ou initiés en appliquant le même type de méthodologie dans différents contextes dans divers pays, soit en construisant des modèles au niveau de l'exploitation soit au niveau d'un bassin versant.

Dans notre cas, le couplage du modèle bio-physique (CropSyst) avec le modèle agro-économique (Olympe) n'est pas direct ; la liaison est faite à travers l'établissement par CropSyst d'une base de données qu'on va utiliser par la suite dans Olympe comme partie de ses données de base. On va suivre le schéma suivant :

Figure 8 : Couplage des modèles biophysique et agro-économique. Données d'entrée et de sortie au niveau de chaque étape.



On conçoit le modèle comme un cycle : à partir de l'analyse des résultats obtenus, on va proposer des solutions permettant de minimiser les problèmes observés, propositions qui seront de nouveau simulées, leurs résultats seront analysés et comparés avec les premiers..., et tout ce processus ayant comme but de faciliter le dialogue entre les acteurs puisqu'il permet de faire ressortir des solutions possibles, tester les alternatives possibles et de dialoguer autour des résultats.

Cette boucle s'arrête quand on trouve une solution satisfaisante pour tous les acteurs impliqués.

Partie III

Simulation de scénarios et négociation

Partie III. Simulation de scénarios et négociation

Chapitre 1. Choix des scénarios

Une fois qu'on est arrivé à modéliser le fonctionnement du système agricole du bassin, l'étape suivante de notre travail consiste à envisager des solutions possibles au problème de l'allocation de la ressource eau et de la pollution azotée d'origine agricole et tester ces solutions, c'est-à-dire simuler les scénarios pour voir l'impact qu'ils auraient sur l'environnement (consommation d'eau, lixiviation) et les résultats économiques des agriculteurs.

Nous allons proposer quelques scénarios possibles pour permettre aux acteurs concernés de commencer le dialogue autour d'exemples concrets, mais c'est à eux d'envisager après leurs propres solutions durant le processus de négociation. Parmi les scénarios envisageables, on en a testé deux :

- ❑ Scénario 1 : optimisation de la fertilisation et de l'irrigation sans diminution des rendements. On s'appuie sur le fait de l'existence pour chaque culture d'une combinaison optimale d'intrants pour laquelle on obtient le rendement maximal. Au delà de ces doses, la plante ne va plus en profiter et il peut y avoir même des effets négatifs sur le rendement de la culture ; l'excès d'eau sera perdu par infiltration ou par écoulement, tandis que l'excès d'azote va rester stocké dans le sol ou bien être lessivé vers la nappe. Notre premier scénario consiste à chercher pour chaque culture, à travers des simulations avec CropSyst, les doses d'irrigation et d'azote qui nous donnent les rendements maximums et remplacer les itinéraires techniques actuels par les « optimaux »
- ❑ Scénario 2 : comme deuxième solution possible, on a considéré une redistribution de la surface consacrée à chaque culture. Dans ce cas, on n'a pas mis en cause les itinéraires techniques actuels, mais le choix des cultures pratiquées dans chaque zone. A cause de l'hétérogénéité des sols du bassin, chaque culture va mieux s'adapter à une zone concrète, car les rendements et les consommations d'une culture diffèrent selon le type de sol. Ainsi, à partir d'un modèle de programmation linéaire, on a cherché à optimiser les assolements à travers le choix des assolements qui donnent la marge globale maximale en respectant une série de contraintes agronomiques, de marché, de consommation d'eau maximale et de lixiviation de nitrates.

Les deux scénarios proposés ne constituent qu'un exemple de ce que l'on pourrait envisager et qui pourrait être proposé par les acteurs dans le processus de négociation.

La construction de nos scénarios est détaillée le long du chapitre, ainsi que les résultats obtenus en termes de consommation, lixiviation et marge, résultats qui seront comparés avec la situation actuelle.

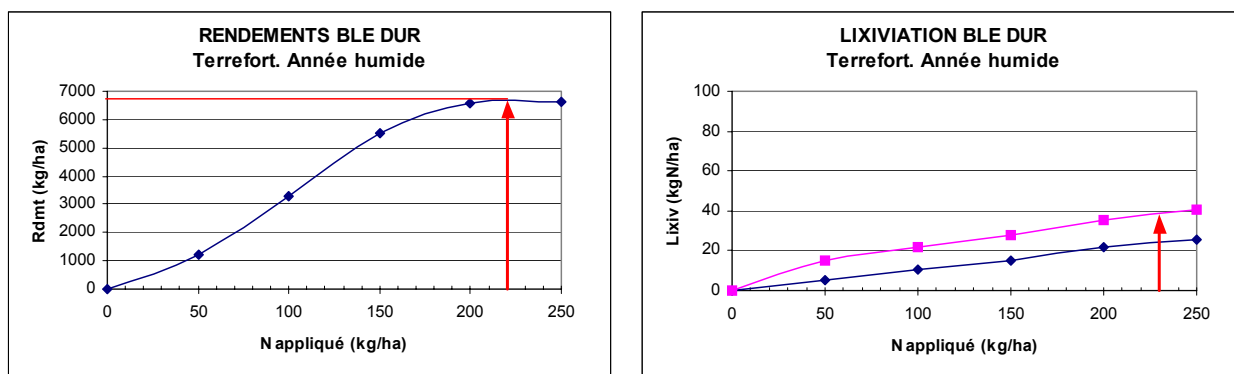
Chapitre 2. Scénario 1: Optimisation de la fertilisation et de l'irrigation sans diminution des rendements

Comme premier scénario, nous avons utilisé le modèle biophysique CropSyst pour définir les quantités optimales des nitrates à appliquer. Dans le cas des cultures irriguées, nous avons également cherché à déterminer les doses d'eau et un calendrier optimum d'irrigation pour chaque type de sol et chaque type d'année, et cela sans réduire les rendements. Ce travail a été réalisé pour les cultures suivantes : blé dur, blé tendre, maïs grain, maïs semences, sorgho en sec et en irrigué, tournesol en sec et en irrigué. Notre but est de pouvoir ajuster les doses d'azote et d'eau (dans le cas des cultures irriguées) en tenant compte des besoins des cultures, ce qui va nous permettre, d'une part, de faire des économies et, d'autre part, de réduire la pollution (bénéfice environnemental).

La procédure a consisté à simuler les cultures choisies avec différentes doses croissantes d'eau et d'azote, en gardant toutes les autres données relatives à la gestion et le reste des fichiers (culture, sol, climat) qui avaient été introduits dans les simulations précédentes. Pour chaque dose d'azote, nous obtenons parmi les données de sortie le rendement de la culture et la lixiviation pour chaque type de sol et type d'année. A partir de ces données, nous avons construit des courbes de réponse du rendement des cultures à la fertilisation et à l'irrigation, que nous montrons dans l'annexe 7. A partir de ces résultats, nous avons choisi comme doses optimales celles qui nous donnent le rendement maximal, qui sont généralement plus faibles que celles utilisées dans la réalité. Dans les cas où les rendements maximums sont supérieurs à ceux obtenus actuellement par les agriculteurs, on a gardé les rendements réels mais on a choisi les itinéraires optimaux donnés par CropSyst pour essayer de minimiser l'utilisation d'intrants. Nous faisons ce choix dans le but de minimiser les excès d'intrants qui contribueraient à augmenter le risque de pollution et une dépense d'eau d'irrigation qui ne va pas faire augmenter les rendements. Une fois choisi le mode de gestion approprié, nous avons introduit les valeurs obtenues dans le modèle Olympe, qui permet de faire une agrégation à l'échelle de la zone de production ou bien de la classe de production. Ainsi, nous pourrions avoir une analyse de l'impact des changements possibles de gestion à l'échelle régionale.

On montre ci-après quelques exemples de courbes de réponse : le graphique 11 représente la variation de rendement et de la lixiviation par rapport à la dose d'azote appliquée pour la culture du blé dur (culture en sec) dans un sol de type terrefort et pour une année humide. Les graphiques 12 et 13 montrent les mêmes types de courbe pour deux cultures irriguées : le maïs grain (sur un sol de type terrefort, année sèche) et le maïs semence (sur brouillards, dans une année moyenne). Pour les cultures irriguées, on a permis au modèle de choisir le volume d'irrigation optimal pour chaque dose d'azote, volume qu'on montre aussi dans les graphiques.

Graphique 11 : Exemple de courbes de réponse du blé conduit en pluviale à la fertilisation : (a) rendement (kg/ha) et (b) lixiviation (kg N/ha) obtenus sur le terrefort et dans une année humide.



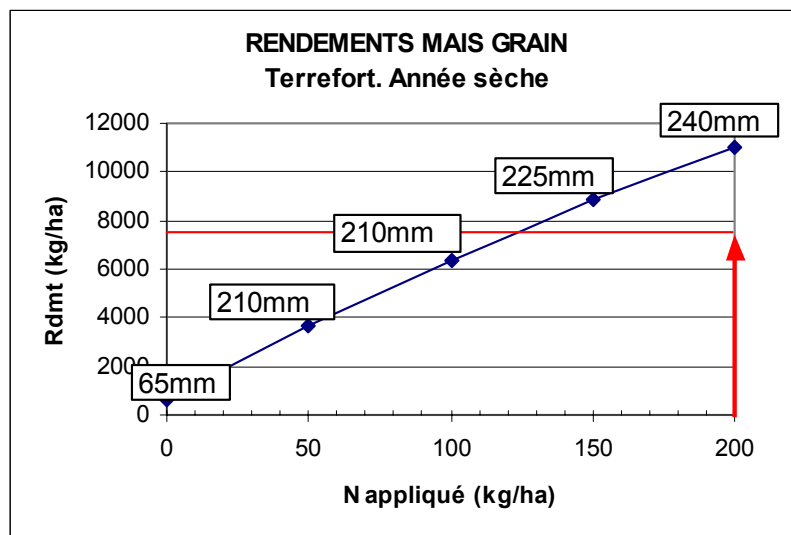
En analysant ces courbes, on peut voir qu'il y a une quantité maximale d'azote au-dessus de laquelle les rendements des cultures n'augmentent plus, car on a atteint la capacité maximale d'absorption d'azote par la culture. Dans l'exemple montré ci-dessus (blé dur dans un sol type terrefort et une année humide), le rendement maximum est atteint pour une dose d'azote de 200 kgN/ha ; au-dessus de cette valeur, le rendement stagne et la lixiviation des nitrates, par contre, continue à augmenter. La quantité d'azote appliquée actuellement par les agriculteurs est de 230 kg/ha, et cela pour obtenir le même rendement (6600 kg/ha). La différence entre ces deux apports ($230 - 200 = 30$ kg N) sera lixiviée, s'il y a assez d'eau, ou bien elle restera dans le sol. D'après les données de sortie, si on réduit l'application d'azote jusqu'à 200 kg/ha, la lixiviation diminuerait de 24,72 à 21,89 kgN/ha, le reste constituera le stock d'azote du sol. Une analyse similaire a été faite pour chaque culture en sec, c'est-à-dire blé dur, blé tendre, sorgho sec et tournesol sec, dans chaque type de sol et chaque type d'année, et pour chaque cas, on a choisi la dose des nitrates qui permet d'obtenir le rendement maximum.

Pour les cultures irriguées (maïs grain, maïs semences, sorgho et tournesol), la procédure a consisté à introduire dans CropSyst, pour chaque type de sol et type d'année climatique, des quantités croissantes d'azote. Dans ce cas, le modèle calcule lui-même les doses d'irrigation appropriées à chaque dose d'azote.

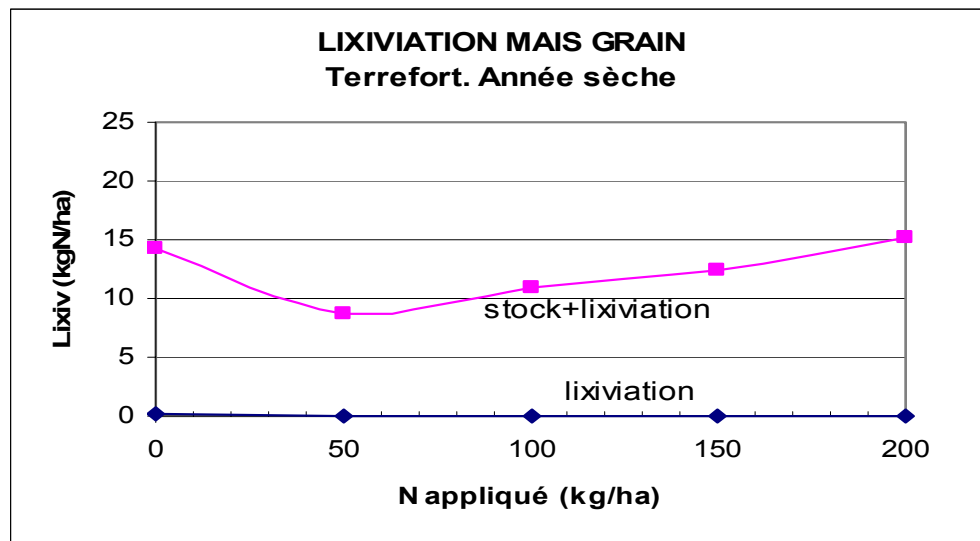
Le fonctionnement du programme consiste à déclencher une irrigation à chaque fois que la réserve du sol atteint la moitié de la réserve utile. Comme données de sortie, on a toujours le rendement de la culture et la lixiviation des nitrates. Pour chaque simulation, nous obtenons des courbes de réponse de ce type :

Graphique 12 : courbes de réponse du maïs grain à la fertilisation : (a) rendements (kg/ha) et (b) lixiviation des nitrates (kg N /ha) obtenus sur un sol de type terrefort et pour une année sèche. Pour chaque dose d'azote, le modèle calcule une dose d'irrigation en se basant sur le calcul du bilan hydrique.

12 A. Variation du rendement du maïs grain par rapport à la dose de fertilisation azotée et volume d'irrigation choisi par le modèle pour chaque dose d'azote



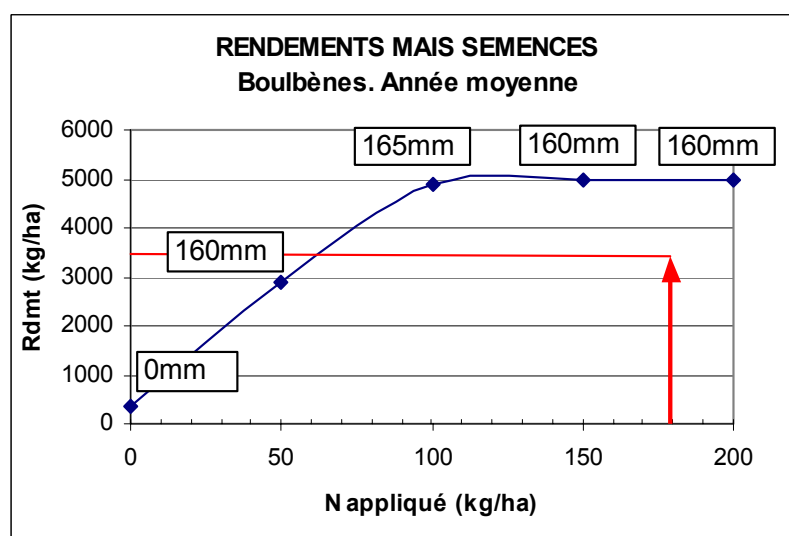
12 B. Variation de la lixiviation du maïs grain par rapport à la dose de fertilisation azotée et volume d'irrigation choisi par le modèle pour chaque dose d'azote



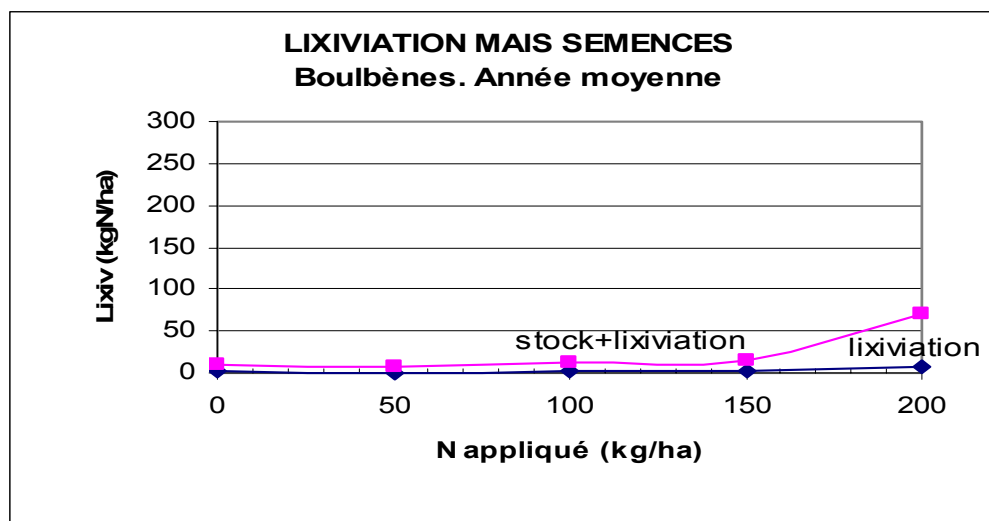
Dans cet exemple, les agriculteurs utilisent actuellement 200 kg d'azote et 200 mm d'eau pour obtenir un rendement de 7700 kg/ha. Mais dans les courbes obtenues, on voit que, pour ce même rendement, les doses optimales d'intrants sont 130 kg d'azote et 250 mm d'irrigation, c'est-à-dire qu'il y aurait une augmentation de la dose d'irrigation et une diminution au niveau de l'azote. L'excès d'azote appliqué ne contribue pas à une augmentation de la production du maïs, mais on observe une augmentation de la lixiviation. On montre ci-dessous un deuxième exemple, celui du maïs semence dans le sol du type boulbènes et pour une année moyenne:

Graphique 13: Courbes de réponse du maïs semence à la fertilisation : (a) rendements (kg/ha) et lixiviation (kgN /ha) obtenus sur un sol de type boulbènes et pour une année moyenne. Pour chaque dose d'azote, le modèle calcule une dose d'irrigation en se basant sur le calcul du bilan hydrique.

13 A. Variation du rendement du maïs semence par rapport à la dose de fertilisation azotée et volume d'irrigation choisi par le modèle pour chaque dose d'azote



13 B. Variation de la lixiviation du maïs semence par rapport à la dose de fertilisation et volume d'irrigation choisi par le modèle pour chaque dose d'azote



Dans ce deuxième exemple, on peut voir que le rendement se stabilise à partir de 100 kg/ha d'azote :

- une augmentation de la quantité de fertilisant n'est pas suivie d'une augmentation du rendement même en optimisant l'irrigation, mais on peut observer par contre une augmentation de la lixiviation.

On doit conseiller alors une fertilisation de 100 kg/ha d'azote et une dose d'irrigation de 165 mm.

Avec cette combinaison (100 kg d'azote, 165 mm d'eau), on obtient un rendement de 4900 kg, supérieur à celui obtenu actuellement avec 180 kg d'azote et 250 mm d'eau. Au-dessus de ces doses, les courbes montrent que la culture ne profite pas de cet azote, ce qui augmente la pollution.

Cette analyse, qui a été faite pour chaque combinaison entre culture, type de sol et type d'année, nous a permis d'établir un tableau de « recommandations », présenté dans l'annexe 8, où nous comparons les quantités d'azote et d'eau appliquées par les agriculteurs, ainsi que les rendements et la lixiviation obtenus, avec les valeurs données par le modèle CropSyst.

On montre ci-dessous (tableau 29) un exemple, pour les cultures du maïs grain et du maïs semence :

Tableau 29 : Doses d'irrigation et de fertilisation appliquées, rendements obtenus, lixiviation et stock d'azote résultant des itinéraires techniques appliqués par les agriculteurs et ceux obtenus après les résultats déterminés par l'établissement des courbes de réponse en utilisant CropSyst pour les cultures du maïs grain et maïs semence.

MAIS SEMENCES

ITINERAIRES REELLES						ITINERAIRES OPTIMALES				
<u>Terrefort</u>										
Type année	Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)	Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)
AH	3197	70	180	26,96	72,32	4025	60	100	4,78	17,94
AM	2946	140	180	54,18	122,32	2946	163	48	0,61	12,23
AS	2074	200	180	74,83	177,81	2074	191	30	0,02	12,11
<u>Alluvions</u>										
Type année	Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)	Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)
AH	3746	90	180	18,67	51,10	4014	25	100	5,16	17,60
AM	3560	200	180	48,97	60,77	4596	120	100	1,99	15,79
AS	2333	275	180	74,29	65,17	3424	165	100	0,01	13,81
<u>Boulbènes</u>										
Type année	Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)	Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)
AH	3648	120	180	42,57	24,06	4024	40	100	10,55	12,21
AM	3392	250	180	29,46	56,95	4871	165	100	1,51	10,51
AS	2218	400	180	79,09	13,63	3676	220	100	0,43	9,92

D'après ces résultats, nous constatons que, pour les cultures en sec (voir annexe 8), les combinaisons optimales des intrants impliquent une diminution de l'azote appliqué (spécialement pour le cas du blé dur) induisant une réduction de la lixiviation sans toutefois réduire les rendements des cultures.

Ce résultat est observé notamment pendant les années humides, avec des quantités d'azote élevées.

Pour les cultures irriguées, les points optimaux de production sont définis par la combinaison volume d'irrigation - quantité d'azote appliquée.

Pour certaines cultures, les optimums obtenus supposent une diminution du volume d'eau par rapport aux volumes réels, plus marquée dans les années sèches ; dans d'autres cas, c'est la quantité d'azote appliquée qui diminue.

En appliquant les nouveaux itinéraires, nous obtenons des diminutions assez importantes de la lixiviation, surtout dans les années sèches et pour les sols type boulbènes.

Pour les cultures irriguées, nous avons établi avec CropSyst un calendrier d'irrigation : dates choisies automatiquement par le modèle pour déclencher les irrigations comme le montre le tableau 30 :

Tableau 30 : Calendrier d'irrigation établi en utilisant CropSyst pour chaque culture, par type de sol et d'année climatique

Culture	Type de sol	Année	Irrigations
Maïs grain	Terrefort	AH	20/07 (40mm), 26/08 (60mm)
		AM	07/07 (60mm), 13/07 (60mm), 02/08 (50mm)
		AS	30/06 (60mm), 07/07 (60mm), 21/07 (70mm), 20/08 (60mm)
	Alluvions	AH	30/08 (70mm)
		AM	07/07 (50mm), 13/07 (50mm), 02/08 (50mm)
		AS	30/06 (50mm), 07/07 (60mm), 21/07 (60mm), 20/08 (55mm)
	Boulbènes	AH	17/07 (40mm), 29/08 (50mm)
		AM	07/07 (50mm), 13/07 (60mm), 02/08 (50mm)
		AS	30/06 (70mm), 07/07 (75mm), 21/07 (70mm), 20/08 (60mm)
Maïs semences	Terrefort	AH	03/08 (60mm)
		AM	14/07 (50mm), 23/07 (60mm), 02/08 (50mm)
		AS	09/07 (60mm), 18/07 (70mm), 24/07 (60mm)
	Alluvions	AH	03/08 (25mm)
		AM	29/07 (60mm), 04/08 (60mm)
		AS	09/07 (50mm), 18/07 (65mm), 24/07 (50mm)
	Boulbènes	AH	03/08 (40mm)
		AM	22/07 (50mm), 29/07 (65mm), 05/08 (50mm)
		AS	09/07 (75mm), 18/07 (75mm), 24/07 (70mm)
Sorgho	Terrefort	AH	03/08 (60mm)
		AM	14/07 (60mm), 22/07 (60mm), 30/07 (60mm)
		AS	14/07 (65mm), 22/07 (65mm), 30/07 (65mm)
	Alluvions	AH	03/08 (30mm)
		AM	14/07 (50mm), 22/07 (50mm), 30/07 (50mm)
		AS	14/07 (60mm), 22/07 (60mm), 30/07 (55mm)
	Boulbènes	AH	02/08 (30mm)
		AM	14/07 (55mm), 22/07 (60mm), 30/07 (50mm)
		AS	14/07 (70mm), 22/07 (70mm), 30/07 (70mm)
Tournesol	Terrefort	AH	---
		AM	29/06 (60mm), 10/07 (60mm)
		AS	17/06 (70mm), 26/07 (60mm)
	Alluvions	AH	---
		AM	29/06 (40mm), 10/07 (50mm)
		AS	17/06 (60mm), 26/07 (60mm)
	Boulbènes	AH	---
		AM	29/06 (55mm), 10/07 (60mm)
		AS	17/06 (65mm), 26/07 (70mm)

Pour la culture du maïs semence, par exemple, dans le sol type boulbènes, on recommande une seule irrigation de 40mm le 3 août en année sèche ; pour les années moyennes, on conseille trois irrigations de 50 mm chacune, le 22 juillet, le 29 juillet et le 5 août ; pour les années sèches, on propose trois irrigations : la première de 50 mm le 9 juillet, la deuxième de 50 mm le 18 juillet et une troisième de 60 mm le 24 juillet.

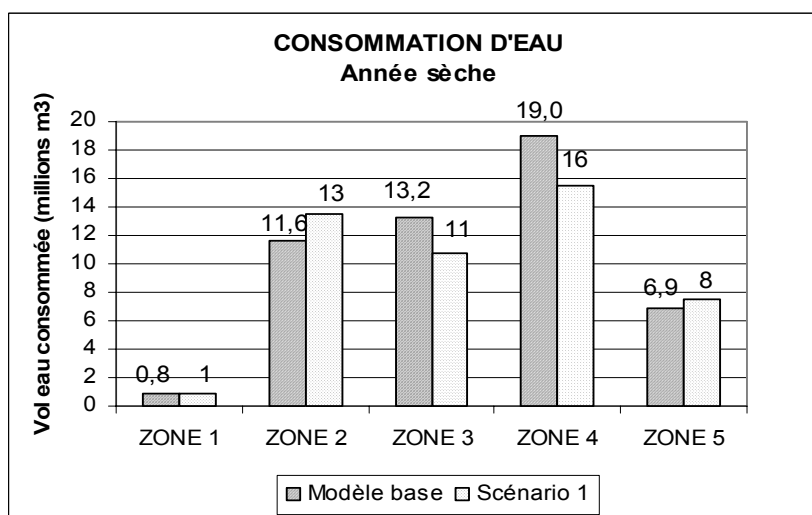
Une fois le nouveau mode de gestion établi par CropSyst, nous avons gardé les données initiales introduites dans Olympe et nous avons remplacé les données initiales des rendements, d'eau et d'azote consommé et de lixiviation de nitrate par celles simulées par CropSyst. L'agrégation des valeurs

individuelles au niveau de la zone et de la classe va nous permettre de rendre compte de l'impact des changements au niveau régional en terme de quantité d'azote appliquée, d'eau consommée et d'azote lixivié. Ces résultats sont classés par type d'année, par zone et par classe de production (l'annexe 9). Les graphes suivants comparent la situation réelle avec celle obtenue avec le nouveau scénario :

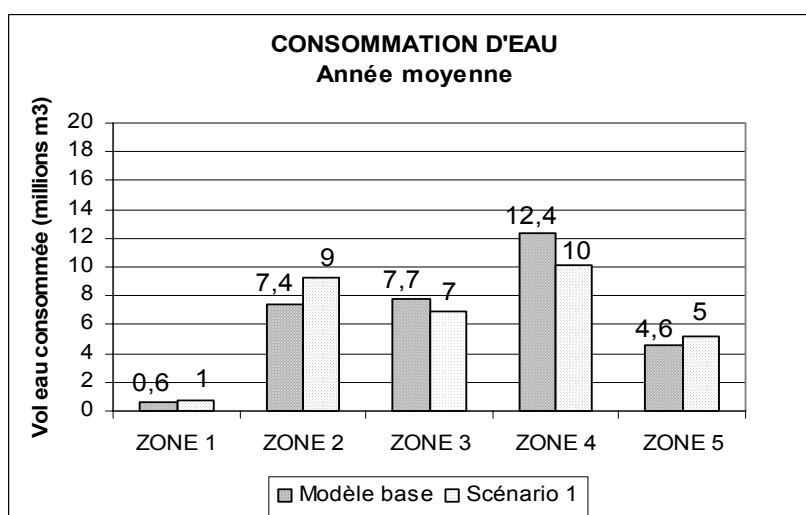
a) Consommation d'eau

Graphique 14 : Comparaison du volume d'eau consommée au niveau des zones dans la situation actuelle avec celui résultant des itinéraires proposés par CropSyst, par type d'année.

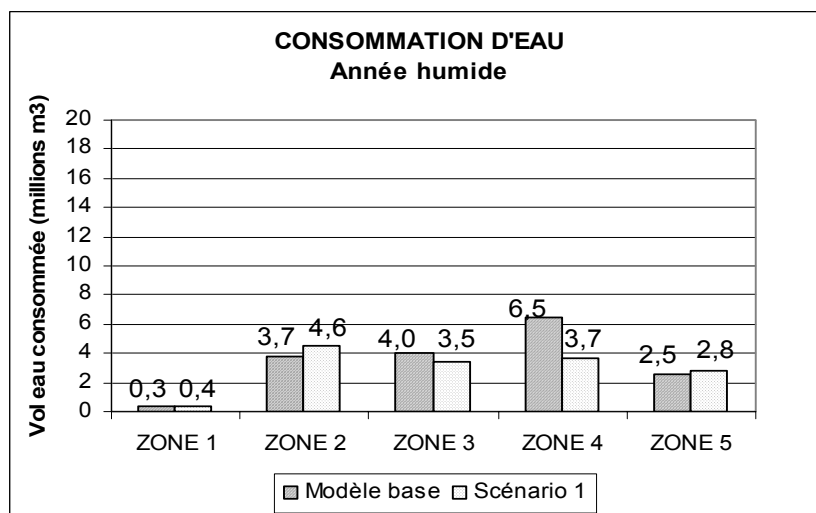
14 A. Volume d'eau consommée au niveau des zones pour une année sèche



14 B. Volume d'eau consommée au niveau des zones pour une année moyenne



14 C. Volume d'eau consommée au niveau des zones pour une année humide

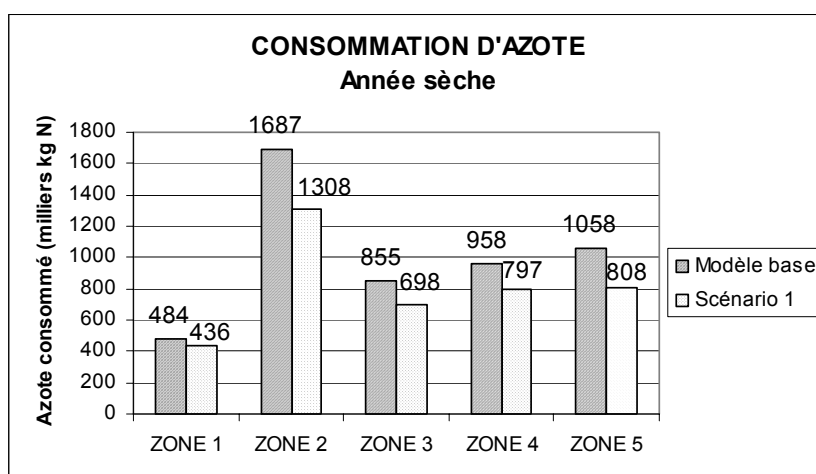


D'après les résultats obtenus, il est possible de réduire considérablement la consommation d'eau, jusqu'à 3,32 millions de m³ pour une année sèche dans l'ensemble du bassin (somme de la réduction de consommation observée pour chacune des 5 zones de production), 0,52 millions de m³ pour une année moyenne et 2,12 millions de m³ pour une année humide, grâce à la meilleure adaptation des doses appliquées aux besoins des cultures. Cette réduction n'est pas répartie également pour les différentes zones ni pour les différentes classes de production. La diminution est enregistrée dans les zones d'alluvions et de boubènes, réduction qui compense une légère augmentation qui a lieu dans les terreforts.

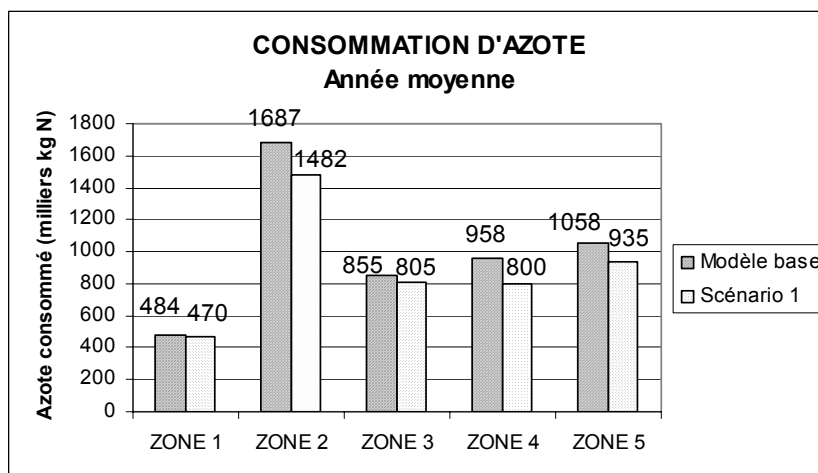
b) Consommation d'azote

Graphique 15: Comparaison des quantités d'azote appliquées au niveau des zones dans la situation actuelle avec celles établies par CropSyst pour chaque type d'année.

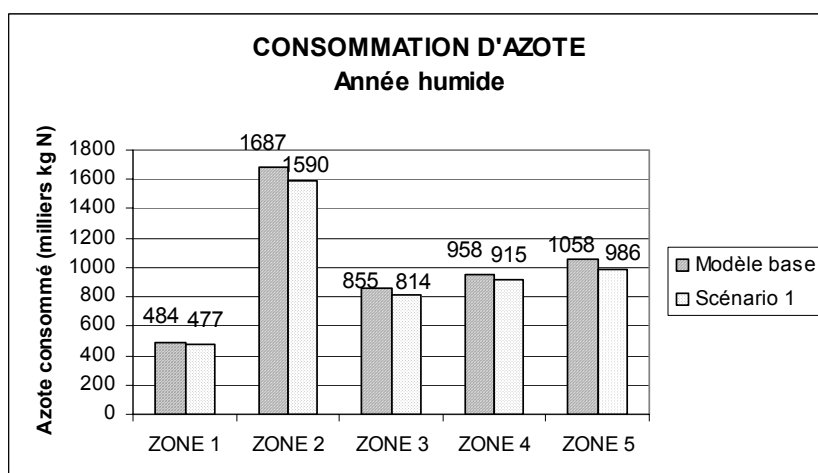
15 A. Azote appliqué au niveau des zones pour une année sèche (en milliers de kg d'azote)



15 B. Azote appliqué au niveau des zones pour une année moyenne (en milliers de kg d'azote)



15 C. Azote appliqué au niveau des zones pour une année humide (en milliers de kg d'azote)

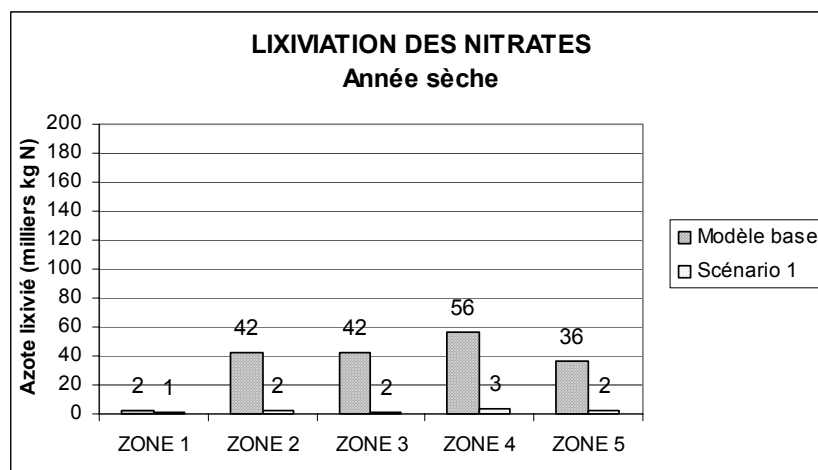


La quantité d'azote appliquée actuellement se situe dans tous les cas au dessus des quantités « optimales » proposées par CropSyst. Nous voyons que les quantités proposées par le modèle, qui correspondent aux doses optimales dans les courbes de réponse pour le rendement obtenu, sont toujours plus faibles que celles que les agriculteurs appliquent actuellement, mais surtout pour les années sèches, où on peut arriver à une économie de presque 20% de l'azote utilisé.

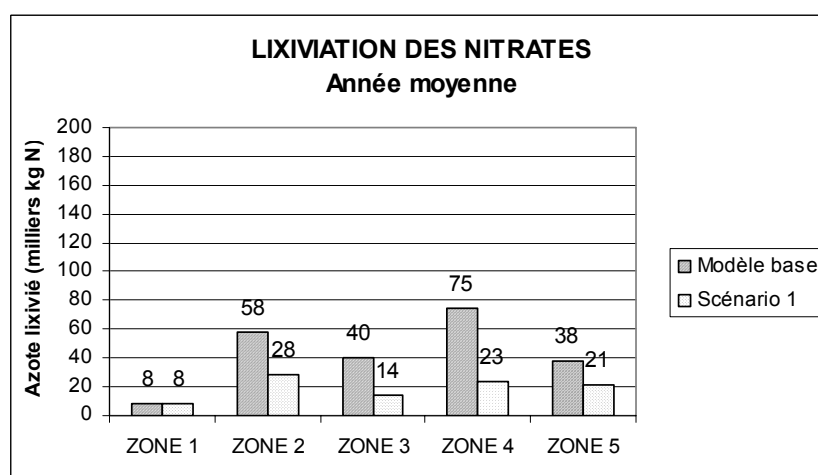
c) Lixiviation des nitrates

Graphique 16 : Comparaison des quantités d'azote lixiviées au niveau des zones dans la situation actuelle avec celles en appliquant les itinéraires techniques « optimaux » établis par CropSyst, pour chaque type d'année.

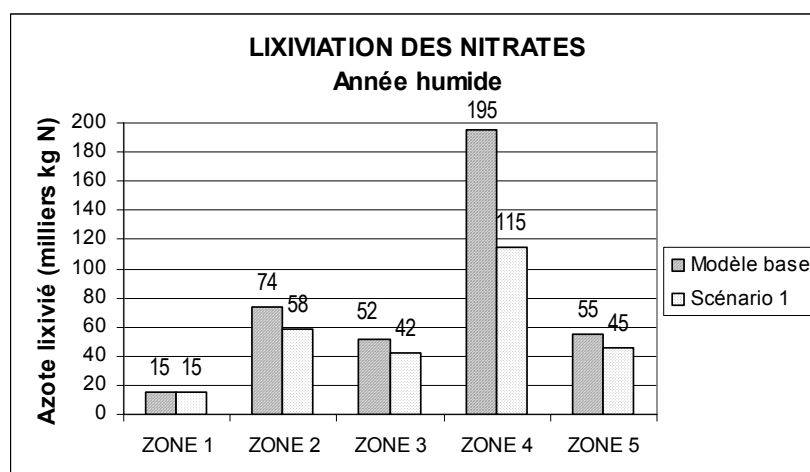
16 A. Azote lixivié au niveau de zones dans une année sèche



16 B. Azote lixivié au niveau de zones dans une année moyenne



16 C. Azote lixivié au niveau de zones dans une année humide



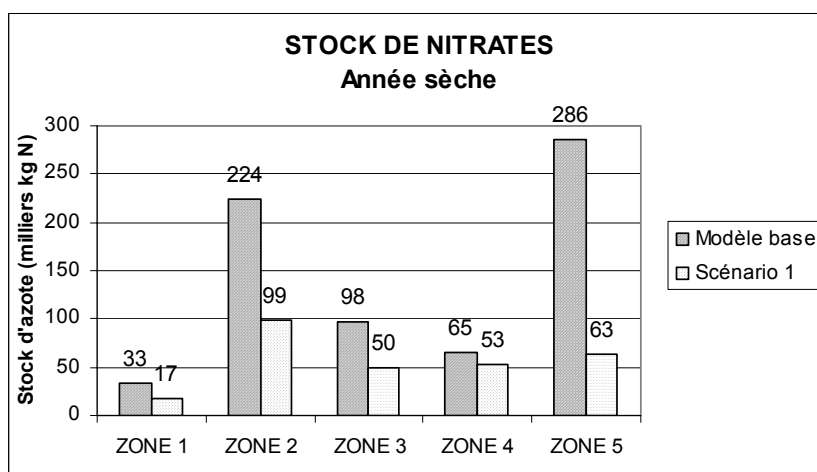
En adoptant les techniques proposées comme optimales par le modèle CropSyst, nous avons réussi aussi à diminuer la quantité d'azote lixiviée. Encore une fois, cette diminution n'est pas répartie d'une façon

égale entre les différentes zones de production, mais elle est beaucoup plus importante dans les sols types brouillards, qui sont des sols plus sensibles à la pollution, suivis des alluvions.

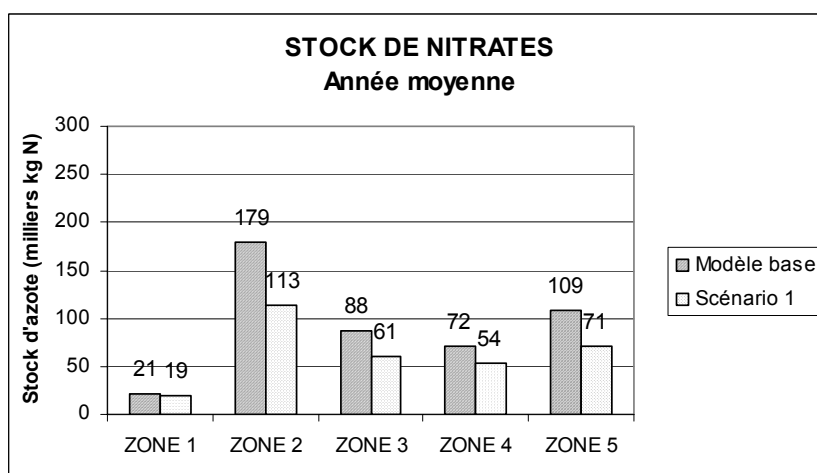
c) Stock de nitrate

Graphique 17 : comparaison des quantités d'azote lixiviées au niveau des zones dans la situation actuelle avec celles en appliquant les itinéraires techniques « optimaux » établis par CropSyst, pour chaque type d'année.

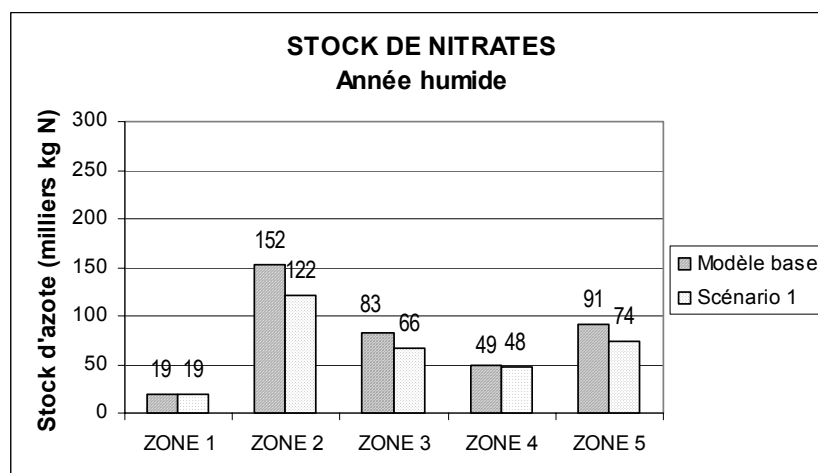
17 A. Stock d'azote au niveau de zones dans une année sèche



17 B. Stock d'azote au niveau de zones dans une année moyenne



17 C. Stock d'azote au niveau de zones dans une année humide

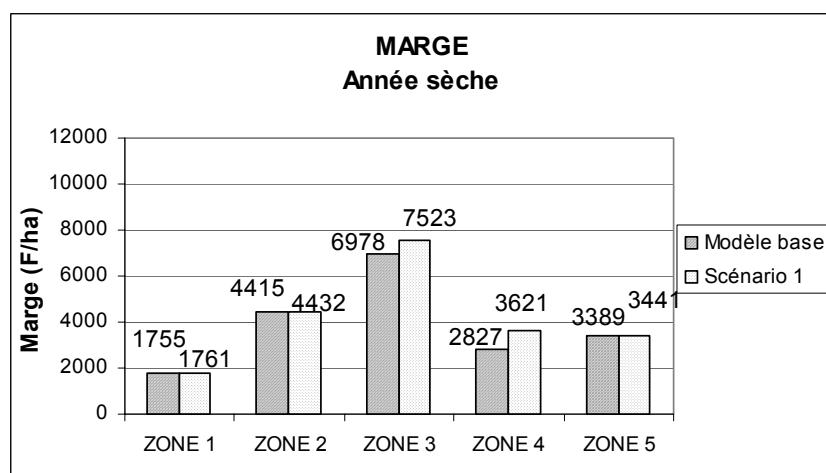


L'adoption des itinéraires «optimaux» entraîne aussi une diminution du reliquat d'azote, qui est très important dans les années sèches, quand les pluies ont été insuffisantes pour lixivier cet azote, qui va constituer un risque de pollution si l'année suivante il y a un excès d'eau.

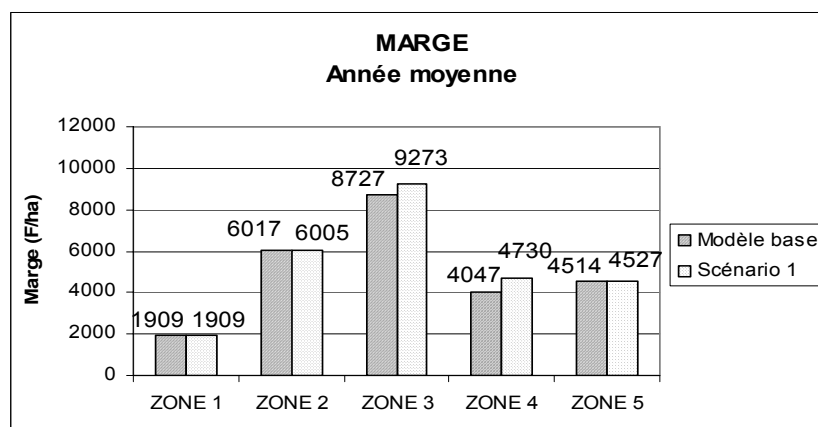
e) Marge

Graphique 18 : Comparaison entre les marges obtenues au niveau des zones dans la situation actuelle et avec les itinéraires proposés comme « optimaux » par CropSyst, dans les trois types d'année.

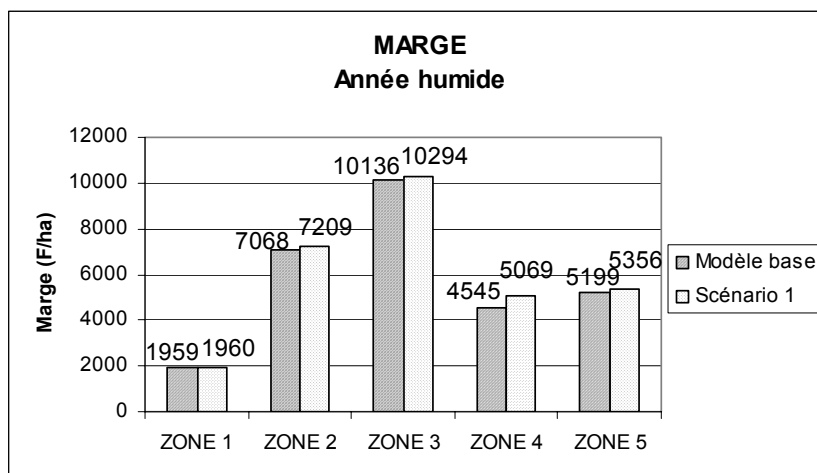
18 A. Marges brutes par zone, pour une année sèche



18 B. Marges brutes par zone, pour une année moyenne



18 C. Marges brutes par zone, pour une année humide



Puisqu'un changement dans le niveau d'utilisation des intrants entraîne généralement un changement de la marge, nous avons analysé cette variable. En comparant la marge brute obtenue dans le modèle actuel avec celle du modèle en appliquant les nouvelles techniques, nous constatons qu'il se produit effectivement une augmentation de la marge brute.

Cette augmentation de la marge est la conséquence d'une diminution dans le niveau d'utilisation d'intrants, notamment de la quantité d'azote et du volume d'eau, pour lesquels on utilise dans le scénario 1 des doses plus ajustées aux besoins des cultures. Comme résultat, les coûts diminuent, avec les mêmes rendements, et la lixiviation diminue aussi.

Chapitre 3.

Scénario 2:

Optimisation de la surface consacrée à chaque culture

Dans le deuxième scénario, nous proposons, en gardant les mêmes techniques culturales utilisées actuellement, une redistribution de la surface consacrée à chaque culture. Afin de trouver la combinaison optimale des cultures, nous allons établir pour chacune des 5 zones du bassin un système d'équations qui montrent la contribution de chaque culture au niveau de la marge, de la consommation d'eau et de la lixiviation totale des nitrates. Ensuite, nous maximiserons la fonction marge globale en utilisant la fonction « solveur » d'Excel, tout en respectant certaines conditions (contraintes) :

- ❑ consommation globale d'eau inférieure ou égale à 2000 m³/ha (quantité figurant dans le projet du PGE Aveyron)
- ❑ réduction de la lixiviation totale de 20% par rapport aux chiffres actuels

Pour la redistribution, nous allons considérer les cultures les plus représentatives de la région, pour lesquelles les données de consommation et de la lixiviation sont connues, c'est-à-dire les mêmes cultures que nous avons simulées dans CropSyst : blé dur, blé tendre, maïs grain, maïs semence, sorgho en sec, sorgho irrigué, tournesol en sec et tournesol irrigué. Les consommations du reste des cultures sont considérées constantes.

Nous avons construit d'abord séparément pour chaque zone un tableau qui rassemble la liste des cultures qui existent avec sa superficie actuelle, sa consommation d'eau, ses pertes des nitrates, sa consommation des nitrates et sa marge par type d'année. Pour un type d'année donnée, la marge globale sera définie comme la somme des marges individuelles des cultures existantes :

$$M_T = \sum (S_i * M_i)$$

avec M_T = marge totale (F) ; S_i = superficie de la culture i (ha) ; M_i = marge unitaire de la culture i (F/ha)

Néanmoins, puisque c'est impossible de savoir à l'avance quel sera le type d'année climatique, la prise de décision sur l'assolement doit être faite par rapport à une fonction marge unique qui considère les marges des différents types d'années et où on a besoin d'intégrer la probabilité d'apparition de chaque type d'année.

Nous avons calculé ces probabilités en se basant sur la pluviométrie annuelle d'une série de 22 années (1970-1991) selon le critère suivant : une année sera considérée humide si sa pluviométrie présente une déviation par rapport à la moyenne supérieure à l'écart type, l'année sera sèche quand la déviation est inférieure à l'écart type et le reste sera considéré années moyennes. Les probabilités d'apparition des types d'années résultantes sont égales à :

- Année sèche : 0,18
- Année moyenne : 0,68
- Année humide : 0,14

La fonction objectif pour une zone déterminée est définie comme :

$$M_T = (0,18 * M_{TAS}) + (0,68 * M_{TAM}) + (0,14 * M_{TAH})$$

M_{TAS} = marge totale pour une année sèche

M_{TAM} = marge totale pour une année moyenne

M_{TAH} = marge totale pour une année humide

On développe chacune des marges :

$$M_T = 0,18 * (\sum S_i * M_{is}) + 0,68 * (\sum S_i * M_{im}) + 0,14 * (\sum S_i * M_{ih})$$

M_T = marge totale (F)

S_i = superficie de la culture i (ha)

M_{is} = marge de la culture i dans une année sèche (F/ha)

M_{im} = marge de la culture i dans une année moyenne (F/ha)

M_{ih} = marge de la culture i dans une année humide (F/ha)

Dans cette formule, nous connaissons les marges de chaque culture par type d'année (données qui apparaissent dans les fiches de culture remplies par le groupe de pilotage), donc l'optimisation se fera à travers le choix des surfaces cultivées pour chaque culture.

Etape préalable à l'optimisation : calibrage du modèle

Avant de chercher la répartition optimale des surfaces avec les nouvelles contraintes environnementales que nous voulons imposer, une étape très importante est le calage du modèle, pour voir si celui-ci répond bien à la réalité. La phase de calage consiste à optimiser la fonction marge totale de chaque zone sous un certain nombre de contraintes agronomiques et de marché qui doivent être respectées, notamment :

- La superficie disponible : $\sum S_i = S$ Totale disponible
Les contraintes agronomiques : relations de proportionnalité entre différents groupes de cultures, qui permettent de garder les types des rotations actuelles : proportionnalité entre superficie en sec – en irrigué, proportionnalité entre les différents types de culture en sec, entre les types de culture en irrigué, superficie maximale des cultures d'hiver et des cultures d'été
- La superficie minimale de maïs ensilage pour assurer l'alimentation du bétail. Cette superficie dépend du nombre des têtes de bovin.
- Les contraintes de marché : superficie maximale pour le blé dur et pour le maïs semence

La solution que le solveur propose sous ces contraintes doit être proche des assolements réels.

Le tableau ci-dessous compare les résultats obtenus, en termes de superficie de chaque culture, avec les données réelles, pour chaque zone de production :

Tableau 31 : Résultats du calage du modèle de programmation linéaire : comparaison entre les superficies réelles de chaque culture (en ha) et les superficies proposées par le modèle

Avec

BD = blé dur

SS = sorgho en sec

		BD	BT	MG	MS	SS	SI	TS	TI
ZONE 1	S actuelle	46	720	252	6	374	76	238	0
	Modèle	100	666	235	6	331	62	295	18
ZONE 2	S actuelle	56	2308	2033	477	715	1119	1143	2
	Modèle	100	2264	2061	500	700	1170	1057	1
ZONE 3	S actuelle	60	872	1441	436	202	222	664	28
	Modèle	100	832	1450	426	304	280	508	26
ZONE 4	S actuelle	46	677	2429	454	73	189	544	35
	Modèle	100	623	2431	500	71	162	560	0
ZONE 5	S actuelle	773	1281	1333	279	86	128	1096	87
	Modèle	773	1209	1371	279	0	136	1222	73

BT = blé tendre

MG = maïs grain

MS = maïs semence

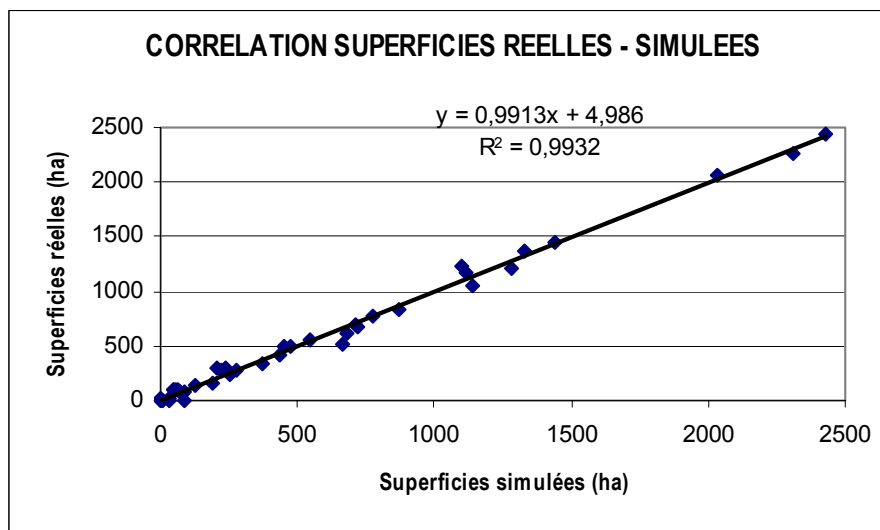
SI = sorgho irrigué

TS = tournesol en sec

TI = tournesol irrigué

Nous avons représenté la corrélation entre les superficies réelles et celles données par l'optimisation linéaire dans le processus de calage (Graphique) :

Graphique 19 : Résultats du calage du modèle de programmation linéaire : corrélation entre les valeurs réelles de superficies de chaque culture dans chaque zone et les valeurs obtenues à partir du modèle



Avec un coefficient de corrélation de 0,9932, nous pouvons considérer que les résultats sont corrects, ce qui veut dire que notre modèle répond bien à la réalité.

Optimisation sous les nouvelles contraintes environnementales

Il s'agit maintenant de chercher pour chaque zone de production une nouvelle répartition des surfaces qui optimise la fonction marge, en ajoutant des nouvelles contraintes que nous voulons imposer et qui vont limiter la consommation d'eau et la lixiviation des nitrates :

- Consommation maximale d'eau :
 $E_T = \sum S_i * E_i \leq 2000 * S_T$ irriguée
 E_T = consommation d'eau totale (m³)
 E_i = consommation d'eau de la culture i (m³/ha)
- Quantité maximale d'azote lixivié :
 $L_T = \sum S_i * T_i \leq 0,8 * L_T$ actuelle
 L_T = lixiviation totale (kg N)
 L_i = lixiviation pour la culture i (kgN/ha)

Le modèle va nous donner comme solution optimale pour chaque zone une nouvelle répartition de la surface, dont sa consommation d'eau ne dépassera pas les 2000 m³/ha et sa lixiviation sera 20% inférieure à la lixiviation actuelle, et avec une nouvelle marge. Ce nouvel assolement implique une diminution de la consommation d'eau et une diminution de la lixiviation, puisqu'il s'agit des contraintes que nous avons imposées, mais cela peut impliquer aussi une diminution de la marge.

Par la suite, nous avons agrégé les modèles par zone puis construit un nouveau modèle de l'ensemble du bassin, qui nous permet de maximiser la marge au niveau régional. Pour cela, nous allons définir une nouvelle fonction objectif globale, égale à la somme des marges de chaque région. Nous allons ensuite considérer les contraintes de consommation maximale d'eau et de maximum de lixiviation au niveau de l'ensemble (2000 m³ par ha irrigué dans l'ensemble du bassin et une réduction de la lixiviation totale de 20% par rapport à l'actuelle). Cette nouvelle optimisation présume une compensation de la consommation d'eau et de la lixiviation des nitrates entre zones. Les assolements seront différents de ceux obtenus auparavant et nous obtenons de nouvelles marges globales par zone.

Les tableaux suivants montrent les résultats obtenus dans les deux types d'optimisation (optimisation de l'assolement de chaque zone indépendamment par rapport à la marge globale de la zone et optimisation de l'assolement de l'ensemble de la région par rapport à la marge globale régionale). Ces résultats sont comparés aux données actuelles.

a) Assolement et marge actuelle par zone

Le tableau 32 rassemble les assolements réels pratiqués dans la région par zone de production, ainsi que la marge globale procurée par la combinaison des cultures existantes. Par exemple, pour la zone 4 (boulbènes), on trouve actuellement 46 ha de blé dur, 677 ha de blé tendre, 2429 ha de maïs grain, 454 ha de maïs semence, 73 ha de sorgho en sec, 189 ha de sorgho en irrigué, 544 ha de tournesol en sec et 35 ha de tournesol en irrigué. Cette combinaison de cultures nous donne une marge globale de 21 millions de francs (marge construite à partir des marges associées à chaque type d'année, en prenant en compte la probabilité d'apparition de chaque type, tel qu'on l'a expliqué au début du sous-chapitre).

Tableau 32 : Superficie occupée actuellement et marge procurée par les cultures considérées dans une possible répartition de la surface

CULT(ha)	BD	BT	MG	MS	SS	SI	TS	TI	Marge(F)	F/ha
Z 1	46	720	252	6	374	76	238	0	7050037	4118
Z 2	56	2308	2033	477	715	1119	1143	2	38250724	4871
Z 3	60	872	1441	436	202	222	664	28	23181913	5906
Z 4	46	677	2429	454	73	189	544	35	21000935	4722
Z 5	60	872	1441	113	0	0	2250	0	23961326	4733
TOTAL	268	5449	7596	1809	1566	1828	3253	93	113444934	4932

b) Assolement et marge résultants d'une optimisation par zone

Dans le tableau 33, on montre les assolements obtenus à partir de l'optimisation des assolements de chaque zone indépendamment et la marge globale procurée par la combinaison de cultures obtenue. Pour

la zone 4 (boulbènes), le modèle nous donne comme optimum 100 ha de blé dur, 442 ha de blé tendre, 1500 ha de maïs grain, 54 ha de maïs semence, 1407 ha de sorgho en sec et 945 ha de tournesol en sec. Cette combinaison de cultures nous donne une marge globale de 16 millions de francs. Puisqu'il s'agit d'une zone avec une consommation d'eau et une lixiviation très importantes, quand on impose les contraintes de consommation et lixiviation maximales, le modèle choisit des cultures moins consommatrices et moins polluantes que celles qui sont pratiquées actuellement (voir la réduction de superficie de maïs semences et la suppression du sorgho du tournesol en irrigué). Mais ce nouvel assolement procure aussi une importante diminution de la marge globale (elle passe de 4722 à 3614 F/ha).

Tableau 33 : Superficie occupée et marge procurée par les cultures considérées après optimisation par zone de la répartition de la surface disponible

CULT(ha)	BD	BT	MG	MS	SS	SI	TS	TI	Marge(F)	F/ha
Z 1	0	511	235	6	586	5	295	75	7025396	4104
Z 2	100	1492	2458	120	1458	1096	1064	64	34763777	4427
Z 3	100	447	1450	49	978	65	788	47	17842651	4546
Z 4	100	442	1500	54	1407	0	945	0	16069581	3614
Z 5	342	1112	1427	279	471	48	1185	200	23547419	4651
Total	642	4004	7069	508	4900	1214	4276	386	99248825	4315

c) Assolement et marge résultants de l'optimisation au niveau régional :

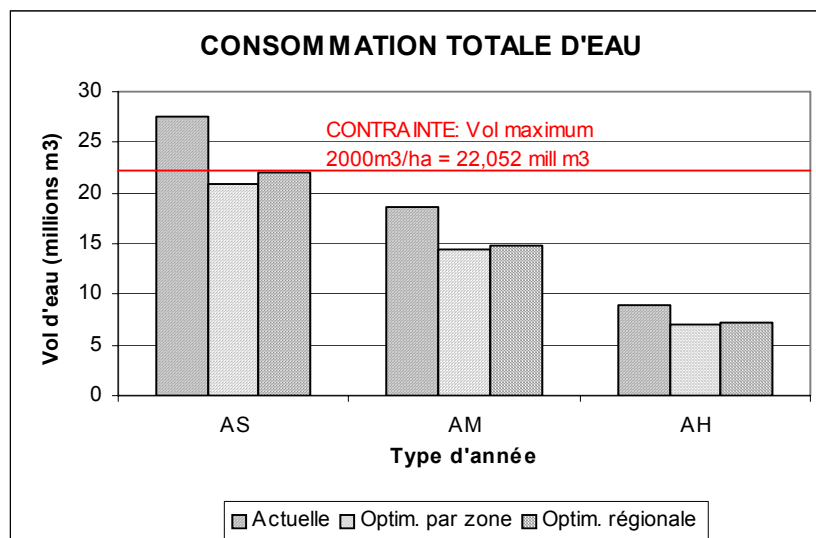
Le tableau 34 montre les assolements obtenus à partir de l'optimisation des assolements au niveau de l'ensemble (on maximise la fonction marge totale régionale et on applique les contraintes d'eau et de lixiviation aussi au niveau de l'ensemble) et la marge globale procurée par zone par la combinaison de cultures obtenue. Pour la zone 4 (boulbènes), le modèle nous donne maintenant comme optimum 542 ha de blé tendre, 1750 ha de maïs grain, 500 ha de maïs semence, 881 ha de sorgho en sec et 744 ha de tournesol en sec. Cette combinaison de cultures nous donne une marge globale de 22 millions de francs. Dans ce cas d'optimisation, le modèle nous donne comme résultat des cultures moins consommatrices et moins polluantes que celles qui sont pratiquées actuellement, mais les différences avec la situation réelle sont moins grandes que dans le cas de l'optimisation par zone. Ce nouvel assolement ne procure pas, par contre, une diminution mais une augmentation de la marge (elle passe de 4722 à 4965 F/ha)

Tableau 34 : Superficie occupée et marge procurée par les cultures considérées après optimisation régionale de la répartition de la surface disponible

CULT(ha)	BD	BT	MG	MS	SS	SI	TS	TI	Marge(F)	F/ha
Z 1	0	511	51	6	768	0	376	0	7066037	4127
Z 2	100	1492	2050	0	1930	915	1366	0	33223546	4231
Z 3	0	547	1450	409	692	263	539	24	23183985	5907
Z 4	0	542	1750	500	881	0	774	0	22077276	4965
Z 5	269	1185	921	279	865	0	1544	0	23408122	4623
Total	369	4278	6222	1194	5136	1178	4599	24	108958967	4737

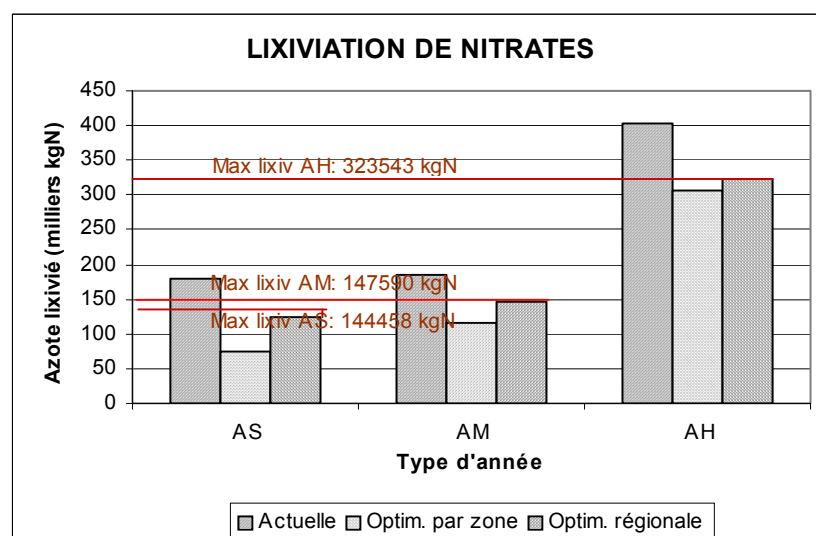
Les assolements optimisés proposés par les modèles vont donner des valeurs de consommation d'eau et de lixiviation au niveau régional qu'on compare dans les graphes suivants :

Graphique 20 : Comparaison entre la consommation totale d'eau par les cultures optimisées au niveau du bassin dans la situation actuelle, après l'optimisation par zone et après l'optimisation régionale, pour les trois types d'année climatique possibles



Pour les deux cas d'optimisation, nous obtenons des consommations d'eau plus faibles que celles qu'on a actuellement, par exemple en année sèche, on passe de 27,5 millions de m³ actuellement à 20,9 millions dans l'optimisation par zone et à 22 millions dans l'optimisation au niveau de l'ensemble. Ces consommations sont toujours plus faibles dans le modèle optimisé par zone que dans celui optimisé au niveau de l'ensemble de la région, mais dans les deux cas, l'eau consommée est toujours en dessous de 2000 m³/ha irriguée, volume qu'on avait imposé comme contrainte. Pour les deux modèles, la réduction de la consommation est plus importante dans les années sèches.

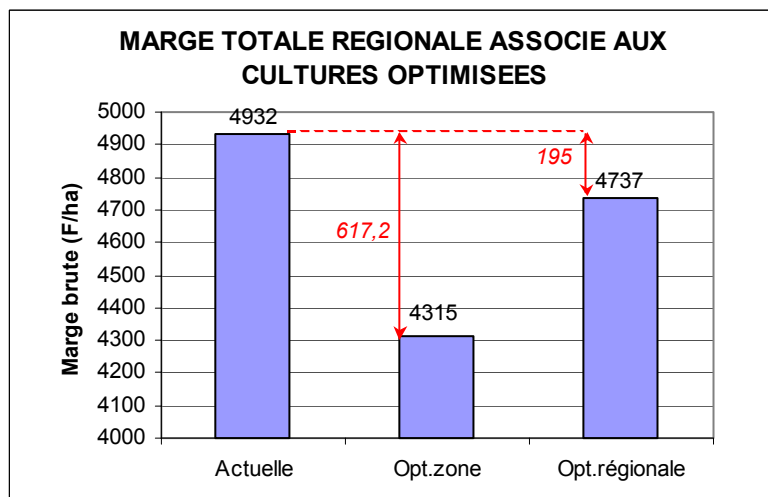
Graphique 21 : Comparaison entre la lixiviation totale des nitrates au niveau du bassin dans la situation actuelle, après l'optimisation par zone et après l'optimisation régionale, pour les trois types d'année climatique possibles.



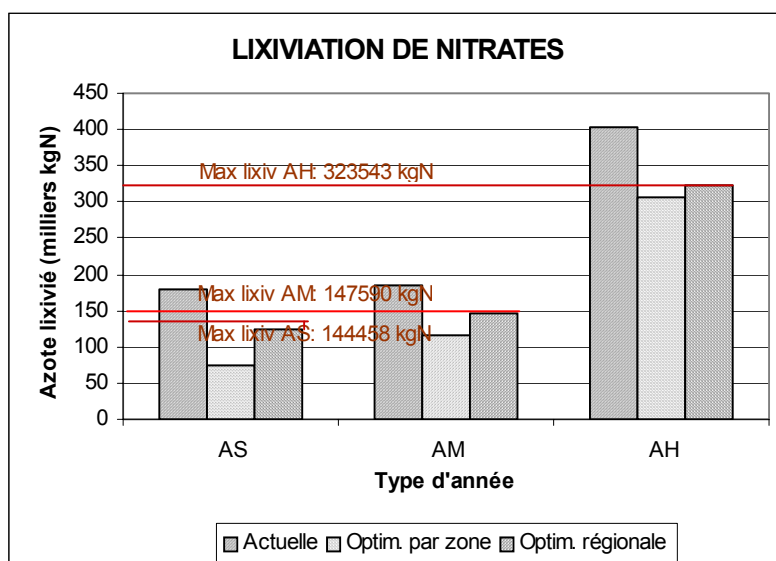
Quand on compare la lixiviation obtenue, comme pour la consommation d'eau, on constate que, dans les deux modèles, on arrive à diminuer la lixiviation en dessous des limites qu'on a imposé comme contrainte (réduction de 20% par rapport à la lixiviation actuelle, calculée par CropSyst). Cette diminution est aussi

plus importante dans le modèle d'optimisation par zone, la différence étant plus importante que pour le volume d'eau, surtout dans les années sèches et moyennes.

Graphique 22 : Comparaison entre la marge totale (marge combinée, qui prend en compte la marge pour chaque type d'année climatique et la probabilité d'apparition de celle-ci) au niveau du bassin associée aux cultures considérées dans l'optimisation dans la situation actuelle, après l'optimisation par zone et après l'optimisation régionale



En comparant la marge totale régionale obtenue actuellement avec celle dégagée dans chaque modèle d'optimisation, nous voyons l'impact économique que supposerait l'adoption des nouveaux assolements proposés :



- ♦ le modèle optimisé par zone présente les diminutions les plus importantes de consommation d'eau et de lixiviation. La diminution de la marge est aussi plus importante que pour le modèle optimisé au niveau de la région (617,2 F/ha contre 195 F/ha).

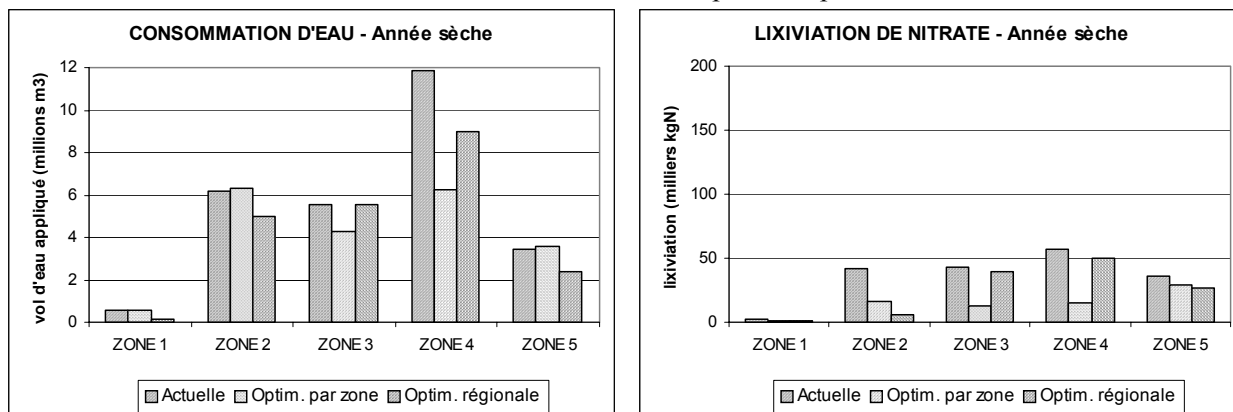
L'optimisation de la marge au niveau de l'ensemble de la région nous permet d'arriver à une solution acceptable du point de vue environnemental (puisque'elle respecte les contraintes imposées, comme dans la solution de l'optimisation par zone) avec un impact économique très inférieur.

Néanmoins, la diminution de la consommation d'eau et de la lixiviation ne sont pas réparties d'une façon homogène dans toutes les zones de production, mais elles sont affectées différemment.

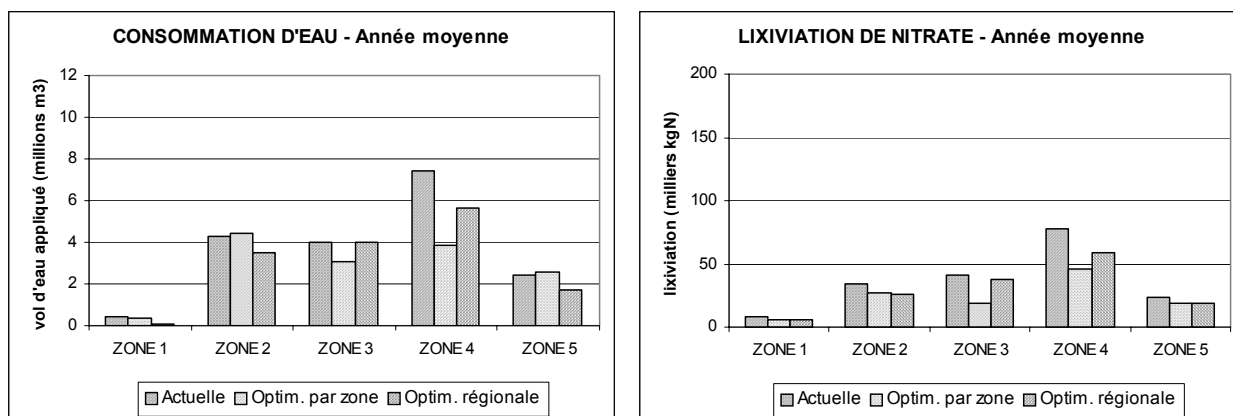
Les graphes ci-après montrent, pour les trois années climatiques possibles, la consommation d'eau et la lixiviation par zone dans la situation actuelle et dans les deux optimisations proposées (optimisation par zone séparément et optimisation régionale).

Graphique 23 : Consommation d'eau et lixiviation de nitrate par zone pour chaque type d'année climatique : comparaison entre les valeurs actuelles et celles qui sont le résultat de l'optimisation par zone et de l'optimisation au niveau régional.

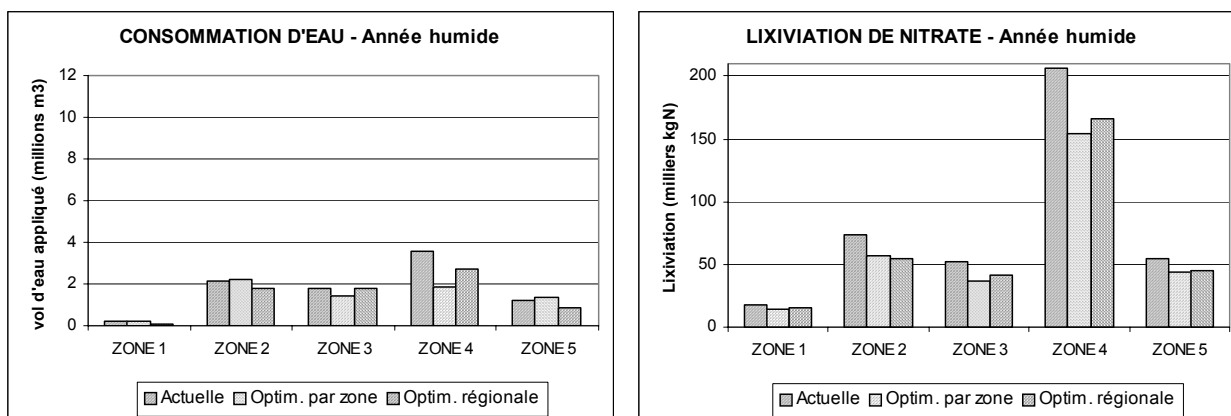
23 A. Consommation d'eau et lixiviation de nitrates par zone pour une année sèche



23 B. Consommation d'eau et lixiviation de nitrates par zone pour une année moyenne



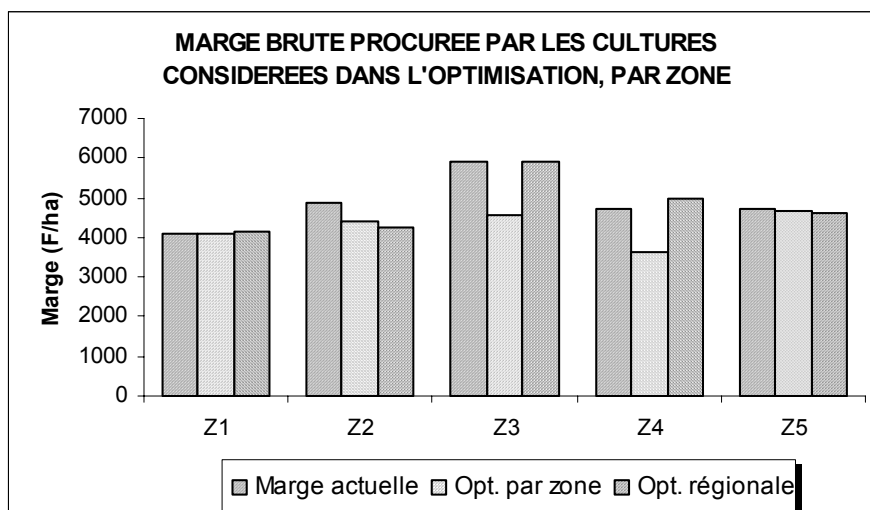
23 C. Consommation d'eau et lixiviation de nitrates par zone pour une année humide



Nous voyons bien que, pour les années sèches, la lixiviation est assez faible et l'aspect le plus important à prendre en compte est le volume d'eau d'irrigation. Par contre, pour les années humides, la consommation se réduit considérablement, alors que la lixiviation se multiplie par 3 par rapport aux années sèches. Dans tous les cas, la zone 4 (boulbènes) est celle qui présente les valeurs les plus préoccupantes, aussi bien au niveau de la consommation en eau qu'au niveau de la lixiviation des nitrates. Nous pouvons constater que, après l'optimisation de la marge, nous arrivons à mieux équilibrer les écarts entre les différentes zones. La zone de boulbènes est celle où les réductions de consommation et de lixiviation de nitrates sont les plus importantes.

Comme résultat pour les nouveaux assolements proposés, on avait vu qu'il y a aussi un changement de la marge brute procurée par les cultures considérées dans l'optimisation (marge brute associée aux cultures de blé dur + blé tendre + maïs grain + maïs semence + sorgho en sec et irrigué + tournesol en sec et irrigué). Ce changement de marge sera différent selon la zone de production. Nous avons représenté la fonction marge totale (combinaison des valeurs des marges pour chaque type d'année pondérées selon la probabilité d'apparition) procurée avec les assolements actuels et avec les assolements proposés dans l'optimisation par zone et dans l'optimisation au niveau régional, pour chaque zone de production (Graphique 24) :

Graphique 24 : Comparaison par zone de la marge procurée par les cultures considérées dans le processus d'optimisation dans la situation actuelle, avec l'optimisation par zone et avec l'optimisation régionale



D'après le graphique ci-dessus, on constate que ces nouveaux assolements auraient comme conséquence :

- la diminution de la consommation d'eau et de la lixiviation qu'on cherchait,
- une diminution de la marge qui, encore une fois, n'est pas au même niveau pour les différentes zones. Si nous comparons les valeurs actuelles avec les marges obtenues après l'optimisation par zone, nous voyons que pour les zones 1, 2 et 5 il n'y a pratiquement pas de variation, alors que les zones 3 et 4 souffriraient d'une baisse significative de sa marge. Cependant, dans le modèle optimisé au niveau régional, les écarts avec les valeurs actuelles sont moins importants. Comme conséquence de l'optimisation régionale, nous obtenons une marge globale régionale un peu plus faible que l'actuelle mais elle est répartie plus uniformément dans les différentes zones. Nous arrivons à mieux équilibrer la marge globale dans l'ensemble de la région.

La conclusion du scénario 2 est qu'il est possible de réduire la consommation d'eau et la lixiviation des nitrates au niveau régional à travers la redistribution des superficies des cultures, en respectant toujours les contraintes agronomiques et de marché qui affectent la production de la région. Cette réduction de la consommation d'eau et de la lixiviation de nitrates affecte principalement les zones qui présentent

actuellement les valeurs les plus critiques. La diminution de la consommation et de la lixiviation va s'accompagner d'une baisse de la marge brute obtenue qui est beaucoup moins importante quand on fait une optimisation par zone dans laquelle on considère les contraintes d'eau et de lixiviation de nitrate au niveau de l'ensemble du bassin versant. Ceci nous montre que dans la recherche d'un optimum avec des objectifs communs, il est possible d'arriver à une meilleure solution à travers la négociation, quand nous considérons des actions possibles au niveau de l'ensemble d'un bassin versant.

Conclusion et perspectives

Conséquence des tensions autour de l'usage de la ressource en eau, tant du point de vue de sa répartition que du maintien de sa qualité, les législations dans le monde et notamment en France, essayent de trouver des solutions satisfaisantes pour l'ensemble des acteurs impliqués. La législation française et européenne aborde ce problème avec de nouvelles approches méthodologiques qui semblent les plus adaptées pour la gestion d'un bien commun : la gestion multiacteurs. C'est le cas par exemple des négociations qui ont lieu actuellement dans le bassin versant Aveyron aval-Lère : une série d'acteurs est impliquée dans un conflit d'usage de l'eau, parmi lesquels l'agriculture joue un rôle primordial, puisqu'elle consomme 80% du total des prélèvements du bassin et parce qu'elle contribue à la détérioration de sa qualité à travers la pollution par les nitrates. Dans un milieu naturel diversifié qui donne des systèmes de cultures variés, nous avons recherché des réponses qui puissent aider les acteurs à négocier de meilleures manières de gérer l'eau et qui prennent en compte la diversité du système agricole.

Pour cela, nous avons cherché des alternatives pour la gestion de l'eau du bassin. Nous avons ainsi utilisé un modèle de fonctionnement du système agricole du bassin, notamment pour montrer l'évolution de la consommation d'eau et les interactions entre les différentes zones de production. A partir des premiers résultats obtenus, le modèle nous a permis d'envisager et tester différentes réponses aux enjeux de la gestion de l'eau en envisageant différents scénarios.

Le modèle du bassin consiste au couplage entre un modèle bio-physique de fonctionnement des cultures et un modèle agro-économique de fonctionnement de l'entreprise agricole. Le couplage des modèles permet une complémentarité entre certaines disciplines, en constituant le lien entre le système physique et économique, entre les techniques de production des cultures et leur impact environnemental et économique. Une fois modélisé le système agricole du bassin, nous avons testé des changements qui nous permettent de réduire la consommation d'eau et la pollution par les nitrates.

Les premiers résultats du modèle (avec les données de terrain), nous ont permis de constater que l'hétérogénéité des sols et des cultures du bassin entraînent des variations de volume d'eau consommée et des quantités de nitrate lixivié. Cette variation de comportement des cultures par zone a pour conséquence des résultats économiques hétérogènes. Lorsque nous testons des scénarios, nous devons considérer cette diversité, sachant que chaque zone de production aura sa propre réponse aux changements proposés.

Un premier scénario envisagé est le changement des techniques de production pour adapter l'application d'intrants (eau et nitrates) aux besoins des plantes, tout en essayant qu'il n'y ait pas excès de ces intrants qui se diffuseraient et qui contribuerait à la pollution. Les résultats de ce premier scénario nous ont montré qu'il est possible d'arriver à une diminution de la quantité d'eau consommée accompagnée d'une diminution de la lixiviation des nitrates sans changer les assolements, grâce aux changements des techniques de production (eau, nitrates). Ce gain n'est pas égal pour toutes les zones ni pour toutes les classes de production. Il dépend aussi du type d'année. Ainsi, la diminution du volume d'eau consommée a lieu principalement dans les zones d'alluvions et de brousses, où elle varie entre 14 et 34% selon le type d'année par rapport à la consommation actuelle. Cette diminution du volume d'eau est beaucoup plus importante pour les années sèches et moins importante pour les années humides. Quant à la diminution de la lixiviation de nitrate, nous avons constaté qu'elle est plus importante pour les années moyennes. Avec les itinéraires techniques proposés, il y a en même temps une augmentation de la marge par rapport à la situation actuelle, conséquence d'une meilleure adaptation du niveau d'intrants aux besoins des cultures. Même si ce scénario constitue une situation optimale difficile à atteindre dans la réalité, il montre déjà qu'il existe des marges de manœuvre variables en fonction des zones et des années et que des démarches de gestion ciblées peuvent permettre de diminuer la consommation d'eau, la pollution et les coûts, tout en gardant les mêmes rendements.

Le deuxième scénario proposé a été l'optimisation de la distribution spatiale des surfaces cultivées. Cette fois-ci, sans changer l'itinéraire technique des cultures, nous arrivons aussi à une diminution de la

consommation d'eau et à une diminution de la lixiviation, qui ne sont pas égales dans les différentes zones de production du point de vue environnemental. Ces diminutions entraînent aussi une diminution de la marge. Nous avons construit deux modèles d'optimisation de l'allocation spatiale des différentes cultures : un premier modèle où les contraintes sont considérées séparément par zone et un deuxième modèle où les contraintes sont au niveau de l'ensemble, c'est-à-dire que nous permettons qu'une zone dépasse la limite imposée par rapport à la consommation d'eau ou à la lixiviation s'il y a une compensation avec les autres zones qui fait que l'ensemble du bassin reste en dessous des limites imposées au niveau régional. Si nous comparons les deux approches, nous constatons que le deuxième modèle nous permet de nous approcher des limites de consommation d'eau et de lixiviation pouvant être imposées par la réglementation. Nous observons dans ces deux scénarios une diminution globale de la marge régionale. Les solutions entraînant une baisse globale de la marge régionale sont évidemment fortement contestée par les agriculteurs. Cependant en désagrégeant les impacts, des gains et des pertes apparaissent en fonction des zones et des systèmes de production. Des modes de compensation seraient donc à imaginer entre zones et systèmes de production, la perte globale relevant, elle, d'un problème de politique publique. Des travaux sur les modes de compensation seraient à envisager : comme par exemple les modalités d'un soutien public à la perte globale incompressible et un marché de droits entre agriculteurs pouvant lisser les inégalités entre zones et systèmes.

Les outils présentés ci-dessus constituent une manière de représenter la réalité d'une façon simplifiée, ainsi que de montrer les résultats des changements dans les assolements et les techniques culturales, tant du point de vue économique (revenu des agriculteurs) qu'environnemental (consommation d'eau, pollution), en tenant compte les conditions du climat, du sol et les aléas qui peuvent arriver. La principale faiblesse de nos modèles est leur caractère statique, car ils ne prennent pas en compte des effets cumulatifs au cours du temps. Nous pourrions imaginer la construction de modèles dynamiques quand nous pourrions disposer d'informations sur les rotations de cultures menées.

Mais nous ne voulons pas nous arrêter dans la représentation du système ; le but de la construction des modèles et de la simulation des scénarios est d'arriver à une interaction avec les agriculteurs qui rende plus facile le processus de négociation. Une des perspectives possibles de ce travail est d'établir un dialogue avec les acteurs à travers de la discussion des résultats obtenus dans les simulations, en essayant de trouver des solutions en commun, satisfaisant toutes les parties. L'étape de négociation pourrait s'envisager sous forme d'un jeu de simulation avec l'ensemble d'acteurs concernés.

Cette démarche s'inscrit dans la nouvelle conception de la législation environnementale française qui, dans les dernières années, attribue une importance croissante aux procédures de consultation du public, avec une délégation plus ou moins étendue de la décision, qui conduisent à l'adoption de principes de gestion plus durables. La loi de l'eau (1992) est une bonne illustration de cette démarche où l'Etat conserve l'autorité formelle de décision mais délègue à une commission locale de l'eau le soin de préciser le contenu d'un accord atteignable que l'autorité, hors situation de crise, entérinera. Dès qu'une problématique explicite a été construite, les parties concernées et les variables négociées sont connues et il reste à expliciter les règles d'allocation des charges de l'accord 2. Les hypothèses de robustesse de l'accord assurant une gestion durable de la ressource conduisent à décrire un processus de communication entre les parties leur permettant d'explorer les solutions possibles et d'arriver à un accord satisfaisant pour chacun.

Tout comme il est expliqué dans la déclaration d'intention du projet AQUAE, « l'objectif à long terme du projet est de doter les instances de concertation locales, comprenant notamment les usagers et les autorités publiques, de supports de médiation (outils et méthodes) pour la négociation des règles de gestion des ressources en eau et des systèmes techniques en interaction forte avec la qualité des hydrosystèmes. Ces supports auront en particulier pour objectif :

- l'amélioration de l'information sur les interactions entre les comportements des acteurs et l'état de la ressource,

- l'amélioration de la communication mutuelle entre les parties prenantes sur leurs motivations, leurs objectifs et leurs contraintes,
- l'amélioration de la connaissance des mécanismes de décision et de concertation des acteurs, en fonction des relations sociales qui préexistent, sont modifiées, et déterminent des influences mutuelles
- l'amélioration de l'organisation (en terme de structure de négociation et de procédure) des processus de concertation

Avec la construction du modèle de fonctionnement de l'agriculture du bassin et la proposition des scénarios, nous avons essayé de répondre au questionnement proposé dans la première partie de notre travail (partie I, chapitre 3.1) :

- ❑ Nous avons montré le rôle de l'agriculture dans le conflit : il s'agit de l'activité qui consomme la partie la plus importante de la ressource (80% du total de l'eau consommée dans le bassin) et elle contribue à la pollution des eaux à travers la lixiviation de nitrate.
- ❑ Nous avons montré aussi qu'il est possible de réduire cette consommation d'eau et cette lixiviation des nitrates par le changement des pratiques culturales ou par le changement des assolements.
- ❑ Comme chercheurs, nous avons appliqué nos connaissances et nos outils pour faciliter les négociations entre acteurs dans ce conflit d'usage : notre façon de traiter les problèmes de gestion de l'eau a contribué à améliorer le dialogue, en favorisant des réunions et des réflexions en commun.
- ❑ Nous ne pouvons pas dire encore s'il y aura un accord entre acteurs pour résoudre les problèmes d'allocation de la ressource eau et arrêter la diminution de sa qualité dans le bassin versant de l'Aveyron – Lère, mais nous avons montré et quantifié des possibilités de changement de techniques de production et d'organisation des assolements qui peuvent améliorer la gestion de la ressource tant du point de vue de sa quantité que de sa qualité.

Bibliographie

1. **AGRESTE** (2002) *L'agriculture en Tarn-et-Garonne*. Paris : Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales. Montauban : Direction départementale de l'agriculture et de la forêt.
2. **Antle, J.M., Stoorvogel J. (2001)**. Integrating site-specific biophysical and economic models to assess trade-offs in sustainable land use and soil quality. *Economic policy and sustainable land use*, p. 169-184.
3. **AQUALIS , ARTLINE , OREADE** (1997) *Etudes préalables au contrat de rivière Aveyron aval – Lère. Rapport de phase I : diagnostic ; qualité et gestion des ressources en eau*. Montauban : Conseil Général du Tarn et Garonne.
4. **AQUALIS , ARTLINE , OREADE** (1997) *Etudes préalables au contrat de rivière Aveyron aval – Lère. Rapport de Synthèse du Rapport Définitif*. Montauban : Conseil Général du Tarn et Garonne.
5. **Attonaty J.M. , Chatelin M.H. , Garcia F.** (1999) Interactive simulation modelling in farm decision-making. *Journal of Computers and Electronics in Agriculture*, 22(2-3), p. 157-170
6. **Attonaty J.M. , Le Grusse P.** (1994) Helping farmers in strategic decision-making. Training of executives from different Mediterranean countries: an experiment- In Jacobsen B., Pedersen D., Christensen J., Rasmussen S. *"Farmers' decision making, a descriptive approach"*. Copenhagen: Institute of Agricultural Economics, p. 235-245. 38th EAAE Seminar, 3 et 5 octobre 1994.
7. **Attonaty J.M. , Soler L.G.** (1992) Aide à la décision et gestion stratégique : un modèle pour l'entreprise agricole. *Revue Française de Gestion*, 1992, n°8, p. 45-54
8. **Barbier, B.; Bergeron, G. (1999)**. Impact of policy interventions on land management in Honduras: results of a bioeconomic model. *Agricultural Systems*, vol. 60, p. 1-16.
9. **Batut S.** (2001) *Confrontation des points de vue des acteurs locaux sur la gestion de l'eau dans le bassin versant de l'Aveyron aval Lère*. Mémoire fin d'études pour le DAA Agro-Environnement, Université Montpellier I, ENSAM
10. **Bel F., Lacroix A., Mollard A. et Regaraiz E.** (mars 1999) Réduire la pollution azotée : les choix préalables d'une politique publique. *Courrier de l'environnement de l'INRA* n°36, p 7-24
11. **Belhouchette, H.** (2004) *Evaluation de la durabilité de successions culturales à l'échelle d'un périmètre irrigué en Tunisie : utilisation conjointe d'un modèle de culture (CropSyst), d'un SIG et d'un modèle bio-économique*. Thèse de doctorat en Sciences Agronomiques, Ecole Nationale Supérieure d'Agronomie de Montpellier. UMR Fonctionnement et conduite des systèmes de culture tropicaux et méditerranéens.
12. **Benoît M., Deffontaines J. P., Gras F., Bienaimé E., Riela-Cosserat R. (1997)**. Agriculture et qualité de l'eau. Une approche interdisciplinaire de la pollution par les nitrates d'un bassin d'alimentation. *Cahiers Agricultures*, n. 6, p. 97-105.
13. **Benslimane O.** (1999) *Pollution des eaux par les nitrates : détermination d'un cahier des charges agri-environnementales et analyse de son impact économique-écologique. Application au bassin versant d'Auradé (Gers, France)* Thesis Master of Science. CIHEAM-IAMM, Montpellier 134 p.
14. **Blanco Fonseca M.** (1996) *Analyse des impacts socio-économiques et des effets sur l'environnement des politiques agricoles : modélisation de l'utilisation agricole des ressources en eau dans la région espagnole de Castille-Leon*. Montpellier: CIHEAM-IAMM. 132 p. (Série Master of Science)
15. **Brossier J., Hubert B. (2000)**. Intégrer les sciences biotechniques, économiques et sociales. Recherches sur les systèmes techniques en agriculture, dans le développement rural et dans la gestion des ressources naturelles au département INRA-SAD. *Cahiers Agriculture*.
16. **Brossier J., Marshall E., Chia E., Petit M. (1997)**. Gestion de l'exploitation agricole familiale. Eléments théoriques et méthodologiques. ENESAD CNERTA, 220 p.
17. **Chatelin M.H. et Poussin J.C.** (1991) Diagnostic d'exploitation agricole : apport de la simulation. *Economie Rurale*, n°206, p. 77-80
18. **Chemak F.** (1999) *Aide à la décision au niveau d'un périmètre irrigué: essai de mise en œuvre des concepts des modèles multi-agents*. Montpellier: CIHEAM-IAMM. 131 p. (Série Master of Science).

19. **Chemak F. et Le Grusse P. (1998)** *Modèle de simulation et aide à la négociation dans un périmètre irrigué tunisien*. Communication au colloque : L'irrigation et la gestion collective de la ressource en eau en France et dans le monde. Montpellier ; 1998/11/19-20. Disponible à l'IAMM.
20. **Chia E., Deffontaines J.P. (1999)**. Pour une approche sociotechnique de la «gestion de la qualité de l'eau » par l'agriculture. *Natures Sciences Sociétés*, vol. 7, n°1, p. 31-42.
21. **Chohin-Kuper A., Rieu T. et Montginoul M. (2003)** *Water policy reforms: pricing water, cost-recovery, water demand and impact on agriculture. Lessons from the Mediterranean experience* [on line]. Water pricing Seminar. Barcelona: Agencia Catalana del Agua and World bank Institute, june 30 – july 2, 2003. [consulté en juin 2004]
<http://www.worldbank.org/watsan/pdf/CohinRieuMontginoulWaterpolicyreformspricingwatercostrecoverywaterdemand.pdf>
22. **Cretenet M. (1995)**. Conception de systèmes de culture durables. Expérimentation et enquête dans l'étude de la fertilité des sols. In: *Sustainable land management in African semi-arid and subhumid regions*. Proceedings of the SCOPE workshop, 15-19 November 1993, Dakar, Senegal. Montpellier (France) : CIRAD, p. 131-139.
23. **Cyert R. M. et March J. G. (1963)** *A Behavioural Theory of the Firm*. New Jersey: Prentice Hall.
24. **Deffontaines J.P., Brossier J. (Eds). (1997)**. *Agriculture et Qualité de l'eau: l'exemple de Vittel*. INRA, 78 p. (Dossier de l'environnement ; n°14).
25. **Deffontaines J.P., Brossier J. (2000)**. Système agraire et qualité de l'eau. Efficacité d'un concept et construction négociée d'une recherche. *Natures Sciences Sociétés*, vol. 8, n°1, p. 14-25.
26. **Deffontaines J-P., Benoît M., Brossier J., Chia E., Gras F., Roux M. (ed.). (1993)**. *Agriculture et qualité des eaux ; diagnostic et propositions pour un périmètre de protection*. INRA-SAD, 334 p.
27. **De Koning G.H.J., Verburg P., Veldkamp A., Fresco L.O. (1999)**. Multiscale modelling of land use change dynamics in Ecuador. *Agricultural Systems*, Vol. 61, p. 77-93.
28. **Douillet A.C. (1998)** Recherche en sciences sociales et action publique: quelle aide à la décision. In Pivot J.M. (ed.) *Gestion des territoires ruraux - Connaissances et méthodes pour la décision publique*. Antony : CEMAGREF p. 155-161. (Coll. Actes de Colloque)
29. **Dupuy B. (ed.) (1997)** Aspects économiques de la gestion de l'eau dans le bassin méditerranéen : actes de l'atelier de Marrakech. [en ligne] Bari (Italie) : CIHEAM-IAM. 526 p. (Options Méditerranéennes, série A. Séminaires méditerranéens ; n°31) [consulté en mars 2004].
http://www.ciheam.org/util/search/detail_numero.php?mot=331&langue=fr
30. **Falconer K., and Hodge 1., (2001)** Pesticide taxation and multi-objective policy-making: farm modelling to evaluate profit/environment trade-offs, *Ecological Economics*, vol. 36, p. 263-279.
31. **Fendri M. (2002)** *L'aide à la décision dans les exploitations oléicoles : l'élaboration et la simulation des plans de développement*. Thesis Master of Science. CIHEAM-IAMM. 173 p.
32. **Flichman G., Jacquet F. (2003)** Le couplage des modèles agronomiques et économiques : intérêt pour l'analyse des politiques [en ligne] *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales*, avril-juin 2003, n° 67, p. 51-69. Communication présentée au Séminaire en économie de la production 28-29/11/2001 à Paris [consulté en juin 2004] <http://www.iamm.fr/bn/doc/?id=PU0024>
33. **Flichman G. (1997)** Bio-economic models integrating agronomic, environmental and economic issues with agricultural use of water [on line]. In: Dupuy B (ed.). *Aspects économiques de la gestion de l'eau dans le bassin méditerranéen : actes de l'atelier de Marrakech ; 1995/05/17-19*. Bari (Italie) : CIHEAM-IAM, p. 327-336 (Options Méditerranéennes : série A. Séminaires méditerranéens ; n°31) [consulté en juin 2004] URL : <http://ressources.ciheam.org/om/pdf/a31/CI971330.pdf>
34. **Haggar J., Ayala A., Diaz B., Reyes C.U. (2001)**. Participatory design of agroforestry systems: Developing farmer participatory research methods in Mexico. *Development in Practice*, vol. 11, n. 4, p. 417-424.
35. **Hemidy L., Maxime F. et Soler L.G. (1993)** Instrumentation et pilotage stratégique dans l'entreprise agricole. *Cahiers d'économie et sociologie rurales*, n°28, p. 92-108
36. **Just, R.E. and. Antle J.M. (1990)**. Interactions Between Agricultural and Environmental Policies: A Conceptual Framework, *American Economic Review*, n. 80, p. 197-202.
37. **Le Bars M. (2003)** *Un simulateur Multi-Agent pour l'Aide à la Décision d'un Collectif : Application à la Gestion d'une Ressource Limitée Agro-environnementale*. Thèse de doctorat, Université Paris IX-Dauphine, UFR Sciences des Organisations.

38. **Le Grusse P.** (1998) Pilotage stratégique et construction d'un processus de décision dans une démarche de conseil en viticulture. Atelier national d'économie viti-vinicole. INRA Montpellier, 26 – 27 novembre 1998. Document disponible à l'IAMM.
39. **Le Grusse P.** (2001) Du « Local » au « Global » : les dynamiques agro-alimentaires territoriales face au marché mondial. Quels instruments d'aide à la décision pour l'élaboration de stratégies territoriales. In : Padilla M., Ben Saïd T., Hassainya J., Le Grusse P. *Les filières et marchés du lait et dérivés en Méditerranée : état de lieux, problématique et méthodologie pour la recherche*. Montpellier : CIHEAM-IAMM. p. 239-257 (Options Méditerranéennes Série B, Etudes et recherches, n° 32)
40. **Mahjoubi R.** (2002) *Intérêt de l'imposition des écotaxes sur la pollution azotée en France : analyse sur un modèle agro-économique dans la région du Tarn-et-Garonne*. Mémoire de recherche pour le DEA « Economie du développement agricole, agro-alimentaire et rural », Université Montpellier I, ENSAM
41. **Menon D.** (2000) *Diversité et modélisation d'exploitations irriguées dans le bassin de la Lère*. ENESAD – Dijon. Série Irrigation R&E 2000-11. Sept 2000.
42. **Mignolet C.M., Schott C., Benoît M.** (2004). Spatial dynamics of agricultural practices on a basin territory : a retrospective study to implement models simulating nitrate flow. The case of the Seine basin. *Agronome* (France), vol. 24, n.4, p. 219-236.
43. **Nocentini L.** (2001) *Application de la théorie des jeux à la gestion locale de l'eau*. Mémoire de DEA « Economie du développement agricole, agro-alimentaire et rural », Université Montpellier I, ENSAM
44. **Okali C., Sumberg J., Farrington J.** (1994). Farmer Participatory Research: Rhetoric and Reality.
45. **Pacini et al.** (2003). Evaluation of sustainability of organic, integrated and conventional farming systems: a farm and detailed spatial scale analysis, *Agriculture, Ecosystems and Environment*, vol. 95, n. 1, p. 273-288.
46. **Perrot C. et Landais E.** (1993) Exploitations agricoles : pourquoi poursuivre la recherche sur les méthodes typologiques? *Les Cahiers de la Recherche Développement*, n°33, 1993, p.13-23
47. **Puech D., Boisson J.M., Coulomb S., Ingles J., Pillet B.** (1995) *Eau-ressource et eau-milieu : vers une gestion durable*. Montpellier : IREE. 257 p. (Cahiers de l'Economie Méridionale)
48. **Reyniers F-N., Benoît-Cattin M.** (1996) *Couplage de modèles en agriculture (actes)* Montpellier : CIRAD. Séminaire sur le couplage de modèles en agriculture, Montpellier 1995/06/14-15
49. **Russel S.** (1999) Rationality and Intelligence. In: Wooldridge M. and Rao A. (Eds.). *Foundations of rational agency*. Dordrecht (NLD): Kluwer Academic Publishers, p 11-33 (Applied Logic Series; Vol.14)
50. **Simon H.E.** (1947) *Administrative behaviour*. New York: MacMillan
51. **Zander P., Kächele H.** (1999). Modelling multiple objectives of land use for sustainable development. *Agricultural Systems*, vol. 59, p. 311-325.

Ressources web :

- Chambre de commerce et d'industrie de Montauban et du Tarn et Garonne. 1992. *Le 82 en chiffres [en ligne]*. Montauban. Juillet 2003. http://www.montauban.cci.fr/cci/htm/info_eco.htm#tourisme
- La Documentation Française : http://www.vie-publique.fr/dossier_polpublic/politique_eau/acteurs/index_acteurs.shtml
- Préfecture de Tarn et Garonne. 2001. *L'Etat en Tarn et Garonne*. Juillet 2003. <http://www.tarn-et-garonne.pref.gouv.fr/>
- Portail du Conseil Général du Tarn et Garonne. 2003. *L'eau sous haute surveillance*. Juillet 2003. <http://www.cg82.fr/enviro-surveau.htm>
- STOCKLE C.O.1996. *CropSyst Model: A brief description*. Biological Systems Engineering Dept, Washington State University. Août 2003. <http://www.bsye.wsu.edu/cropsyst/>
- INRA Rennes, Unité Mixte de Recherche Sol-Agronomie Spatialisation : <http://www.rennes.inra.fr/umrsas>
- Institut Français de l'Environnement, dossier de presse 15 mai 2002 :

http://www.ifen.fr/presse/dossier_ree2002.htm

- RIO P. 2003. *Les outils d'aide à la négociation acceptant une information incomplète conduisent-ils à des accords efficaces?* 20^e Conférence Européenne de la CIID, 17-19 septembre 2003. Montpellier – Corum. Mars 2004. <http://afeid.montpellier.cemagref.fr/Mpl2003/Conf/Rio.pdf>

Annexes

Liste des annexes

Annexe 1 : Contrat de la rivière Aveyron aval – Lère : Classement des actions selon volets de la circulaire d'application de la loi sur l'eau.....	110
Annexe 2 : Contrat de la rivière Aveyron aval – Lère. Fiche-action N° VI.1 : Actions de sensibilisation, formation, conseil, assistance auprès des agriculteurs.....	111
Annexe 3 : Analyse de la structure des exploitations par commune.....	114
Annexe 4 : Définition de 3 types d'année, définition de 3 types de sol.....	119
Annexe 5 : Valeurs des rendements et lixiviation des nitrates obtenues comme résultats des simulations avec CROPSYST par culture, type de sol et type d'année avec les itinéraires techniques actuelles	125
Annexe 6 : Résultats du calage du modèle OLYMPE : corrélation entre superficie cultures sorties du modèle et superficies réelles par classe de production	128
Annexe 7 : Scénario 1 : Courbes de réponse des cultures aux doses croissantes de fertilisants et optimisation des doses d'irrigation à partir de CROPSYST et comparaison avec les doses d'intrants et les rendements réels	132
Annexe 8 : Scénario 1 : Comparaison entre doses d'irrigation et de fertilisation azotée appliquées dans la réalité et doses proposées par CROPSYST comme optimales, avec les rendements, la lixiviation et le stock azoté résultant de chacun des deux modèles	149
Annexe 9 : Scénario 1 : Impact sur la consommation d'eau, d'azote, sur la lixiviation de nitrate, sur le reliquat azoté et sur la marge des techniques proposées pour l'ensemble du système	151
Annexe 10 : Scénario 2 : Comparaisons entre assolements et marge brute dans le système actuel et dans l'optimisation proposée	155
Annexe 11 : Comparaison des résultats obtenus avec les deux scénarios en termes de diminution de la consommation d'eau et de diminution de la lixiviation par rapport à la situation actuelle	156

Annexe 1

Contrat de la rivière Aveyron aval – Lère : Classement des actions selon les volets de la circulaire d'application de la loi sur l'eau

Les actions programmées sont ci-après regroupées sous les trois volets mentionnés par la circulaire ministérielle d'application de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992 :

- **Volet A : Programmes d'assainissement des eaux résiduaires urbaines, programmes de dépollution des industries, de l'élevage et de l'agriculture, à réaliser ou à achever.**
 - V.1 Réduction de la pollution d'origine domestique
 - VI.1 Action de sensibilisation, formation, conseil, assistance auprès des agriculteurs
 - VI.2 Etude de définition des dispositifs enherbés
 - VII.1 Enquête sur les établissements industriels
 - VIII.1 Suivi de la qualité du milieu aquatique
- **Volet B**
 - B.1 : Travaux de restauration et de renaturation des berges et du lit, de mise en valeur des milieux aquatiques et des paysages
 - I.1 Restauration des cours d'eau, mise en place d'un plan de gestion (aussi volet C)
 - I.2 Organisation du libre passage en bordure de cours d'eau pour la restauration et l'entretien
 - II.1 Valorisation des sites naturels du bassin versant
 - III.1 Elaboration d'une charte paysagère du bassin versant Aveyron aval – Lère
 - IV.1 Valorisation paysagère et touristique des cours d'eau
 - IX.1 Amélioration des conditions de vie et de circulation du poisson
 - X.2 Programme des travaux de restauration des seuils hydrauliques
 - X.3 Programme de surveillance et d'entretien des seuils hydrauliques
 - B.2 : Travaux de protection localisée des lieux habités contre les crues (travaux et mesures réglementaires)
 - Note : Sont ici listées de façon plus large toutes les actions relatives à la gestion quantitative des eaux*
 - Rappel : le thème « crues » n'a pas été développé dans le cadre des études préalables au contrat de rivière étant donné qu'un PPR Inondation a été élaboré en parallèle à ces études (Cf. éléments de synthèse au § II.4)*
 - X.1 Sécurisation de la prise d'eau à l'amont de la chaussée de Bellerive sur l'Aveyron
 - XI.1 Gestion coordonnée des seuils hydrauliques – faisabilité d'annonce des crues sur la Lère et le Cande
 - XII.1 Mesure des prélèvements en rivière et suivi des débits sur la Lère et le Cande
 - XII.2 Réalimentation des ruisseaux du Tordre et de la Tauge par la retenue du Tordre
 - XII.3 Optimisation de la retenue du Gouyre
 - XIII.1 Incitation à la création de nouvelles retenues collinaires individuelles situées en dehors du réseau hydrographique, en substitution aux pompes existantes
 - XIII.2 Recherche de sites nouveaux pour retenues collinaires et évaluation de leur potentiel
- **Volet C : Programme d'entretien et de gestion de la rivière, structure chargée de la mise en œuvre du contrat et de l'organisation retenue pour assurer durablement la gestion de la rivière, les modalités de suivi du contrat**
 - I.1 Restauration des cours d'eau, mise en place d'un plan de gestion (aussi volet B1)
 - XIV.1 Mise en place d'un technicien de rivière
 - XIV.2 Participation à l'initiation du SAGE Aveyron et au Plan de Gestion des Etiages de l'Aveyron
 - XIV.3 Communication / Information / Formation

Annexe 2

Contrat de la rivière Aveyron aval – Lère. Fiche-Action N° VI.1 : Actions de sensibilisation, formation, conseil, assistance auprès des agriculteurs

Domaine(s) concerné(s)

Milieu aquatique

Actions déjà réalisées ou en cours

- 11 diagnostics Dexel en cours, 30 prévus d'ici 2001
 - Enquête et suivi concernant les produits phytosanitaires sur le bassin versant du ruisseau de Paris
 - Suivi des phytosanitaires sur la Lère à Réalville et l'Aveyron à Cayrac

Référence(s) réglementaires

Ne sont cités ici que quelques-uns des textes de référence :

- Loi n°76-633 du 19 juillet 1976 relative aux installations classées pour la protection de l'environnement
- Directive nitrates n°91/676/CEE du 12 décembre 1991
- Arrêté du 29 février 1992 sur la mise en conformité des bâtiments d'élevage
- Décrets n°93-742 et 93-743 du 29 mars 1993 relatif à la nomenclature des opérations soumises à autorisation ou à déclaration en application de la loi sur l'eau du 3 janvier 1992
- Décret du 27 août 1993 relatif à la protection des eaux contre la pollution des nitrates d'origine agricole
- Accord du 8 octobre 1993 relatif au programme de maîtrise des pollutions d'origine agricole
- Arrêté du 2 novembre 1993 officialisant l'entrée des élevages de plus de 70 U.G.B. dans le dispositif financier des agences de l'eau (aide-redevance) et débouchant sur la mise aux normes des bâtiments d'élevage
- Arrêté du 22 novembre 1993 relatif au code des bonnes pratiques agricoles
- Arrêté du 4 mars 1996 et circulaire du 10 juin 1996 relatifs aux programmes d'action à mettre en œuvre dans les zones vulnérables afin de réduire la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole
- Décret n°96-540 du 12 juin 1996 réglementant le déversement et l'épandage des effluents d'exploitations agricoles non classées
- Règlement sanitaire départemental

Exposé des motifs

L'analyse des chroniques de concentrations sur le réseau de suivi de la qualité des eaux de la Lère et de l'Aveyron, ainsi que les évaluations de flux de pollution, ont mis en évidence l'importance relative des charges azotées et organiques d'origine agricole par rapport aux charges d'origine domestique ou industrielle, ainsi qu'un impact élevé de l'activité agricole en période pluvieuse. Des surconcentrations en produits phytosanitaires apparaissent en certains secteurs du réseau hydrographique et dans les captages d'eau potable. Sans être alarmante, la situation justifie que soit engagée dès à présent une action de sensibilisation des agriculteurs.

Maître d'ouvrage

Structure de Gestion du contrat de rivière avec l'aide d'un comité technique regroupant notamment la Chambre d'Agriculture, la DDAF, l'ADASEA, la DSV, l'Agence de l'Eau, le CSP.

Description technique de l'action

- Mise en place d'un poste de technicien agricole et d'une structure d'accueil délocalisée (locaux de la Chambre d'Agriculture à Caussade par exemple)
- Réalisation d'un diagnostic agronomique global devant aboutir à l'identification des **zones agricoles homogènes** et de secteurs sensibles. Ce diagnostic, qui complètera l'analyse effectuée dans le cadre de la délimitation des zones vulnérables du département et les inventaires réalisés lors des études préliminaires au contrat de rivière, comportera notamment :
 - un inventaire exhaustif des exploitations agricoles et des bâtiments d'élevage,
 - une synthèse des productions animales et végétales,
 - une collecte des informations concernant les pratiques agricoles (pratiques culturales, bilans en azote et phosphore, utilisation de produits phytosanitaires,...),
 - une approche des risques de pollution liés aux bâtiments d'élevage,
 - une synthèse de l'occupation des sols et des données pédologiques,
 - une analyse des contraintes environnementales (zones de circulation karstique, utilisation des ressources souterraines, ...)
 - des campagnes d'analyses (composés azotés et phosphorés, matières en suspension, phytosanitaires) en période pluvieuse

NB : les éléments recueillis dans le cadre de la définition des dispositifs enherbés seront également intégrés à ce diagnostic

- Choix d'un sous-bassin représentatif sur chaque zone agricole en fonction des éléments fournis par le diagnostic précédent et des possibilités de mobilisation des agriculteurs. Dans ce qui suit, ces sous-bassins (un par zone agricole) sont dénommés **sous-bassins témoins**.
- Lors de la première année : visite des agriculteurs de chaque sous-bassin témoin. L'objectif de ces visites étant : la sensibilisation, l'information, l'aide technique.

La sensibilisation portera prioritairement sur l'intérêt de :

- la fertilisation raisonnée,
- la protection des ressources en eau contre les pollutions liées à l'activité d'élevage,
- l'usage raisonné des produits phytosanitaires,
- les méthodes préventives de lutte contre l'érosion des sols,
- la maîtrise de l'irrigation,

L'information pourrait aborder successivement :

- les aspects réglementaires,
- l'état de l'art en matière de pratique culturale et de lutte contre la pollution,
- l'efficacité des techniques, leur coût et les gains indirects associés (sur ce point des opérations grandeur nature pourront servir de référence)

L'aide technique, destinée aux agriculteurs désireux d'aller plus loin dans la démarche, peut prendre la forme :

- d'une permanence assurée à date fixe,
- de visites périodiques de l'exploitation concernée,
- de visites groupées d'expériences pilotes

Les années suivantes :

- suivi des sous-bassins témoins,
- extension de l'opération à d'autres sous-bassins.

A la fin de chaque année, un bilan de l'opération sera effectué qui permettra d'orienter le programme de l'année suivante. A cette occasion, seront pris en compte les résultats des mesures physico-chimiques effectuées dans le cadre de l'action concernant le suivi qualitatif.

Coût estimatif (H.T., 1998)

Investissement : 0 kF

Aides aux travaux ou à la modification des pratiques agricoles : non incluses dans l'action. Pour quelques exploitations, les coûts et les sources de financement possibles pourront être établis en fin de contrat.

Fonctionnement : 370 kF/an, soit 1850 kF/5ans

- 1 technicien à plein temps durant la durée du contrat : 350 kF/an (frais de mission compris) soit 1750 kF sur 5 ans
- Frais divers dont supports de communication : 100 kF
- Mise en place du suivi de la qualité des eaux dans le cadre de l'évaluation des impacts de l'agriculture en période pluvieuse : p.m. (voir fiche action correspondante)
- Mise en place du suivi de la qualité des eaux dans le cadre de la recherche des secteurs sensibles à l'érosion : p.m. (voir fiche action correspondante)
- Mise en place du suivi de la qualité des eaux dans le cadre de la recherche des phytosanitaires : p.m. (voir fiche action correspondante)

Partenaires techniques et financiers pressentis

Partenaires techniques : AEAG, CA, DDAF, ADASEA, DSV, CSP

Partenaires financiers : Agence de l'Eau (30%), Etat (50%), Département (1 poste)

Indicateurs de suivi des actions

Identification des bassins versants témoins

Pourcentage d'agriculteurs contactés et pourcentage d'agriculteurs adhérant à l'action.

Evolution des caractéristiques physico-chimiques, bactériologiques et hydrobiologiques des cours d'eau aux stations de suivi (stations du réseau existant et stations du réseau spécifique au contrat de rivière)

Calendrier – Durée – Logique d'enchaînement avec d'autres actions du programme

Les actions de sensibilisation menées en vue d'une meilleure maîtrise de la pollution par les composés azotés et organiques peuvent être initiées dès le démarrage du contrat de rivière. L'expérience en la matière étant jugée suffisante.

Les actions relatives aux produits phytosanitaires devront attendre les résultats de l'enquête sur les consommations de phytosanitaires et la synthèse des premières campagnes de mesures effectuées sur le réseau hydrographique ainsi que les résultats de la cartographie des secteurs soumis aux risques d'érosion.

Annexe 3

Analyse de la structure des exploitations par commune

1. Nombre des exploitations, SAU et produit brut des exploitations par commune

CANTON	COMMUNE	Nombre exploit	SAU		Produit brut	
			SAU ha	Moyenne	PB total	PB moyen
	Caussade	65	2877,16	44,26	18315285,86	281773,63
	Cayrac	13	500,96	38,54	4354635,3	334971,95
	Cayriech	13	531,35	40,87	2536001,61	195077,05
	Lavaurette	13	719,91	55,38	2176683,18	167437,17
	Mirabel	66	1920	29,09	24320875,51	368498,11
	Monteils	13	404,17	31,09	1506768,44	115905,26
	Réalville	49	1665,13	33,98	16261126,92	331859,73
	Saint-Cirq	24	1254,55	52,27	4481241,49	186718,40
	Septfonds	17	1002,88	58,99	3794872,1	223227,77
	St-Georges	13	469,46	36,11	2051924,74	157840,36
	St-Vincent d'Autejac	35	1400,33	40,01	14503340,89	414381,17
Caussade		321	12745,9	460,60	94302756,04	293778,06
	Caylus	62	4155,04	67,02	15137898,04	244159,65
	La Salvetat Belmontet	36	1312,89	36,47	7696725,21	213797,92
	Lacapelle-Livron	10	889,31	88,93	3581174,81	358117,48
	Loze	4	288,67	72,17	586748,5	146687,13
	Mouillac	3	155,99	52,00	319054,3	106351,43
	St-Projet	16	858,91	53,68	2705975,65	169123,48
Caylus		131	7660,81	370,26	30027576,51	229218,14
	Lafrançaise	93	2090,89	22,48	31742951,06	341322,05
	L'honor de Cos	73	1357,67	18,60	32664198,43	447454,77
	Montastruc	16	238,7	14,92	4445355,15	277834,70
	Piquecos	13	278,52	21,42	6866763,03	528212,54
Lafrançaise		195	3965,78	77,42	75719267,67	388303,94
Molières		14	480,65	34,33	3597746,78	256981,91
	Bruniquel	17	446,94	26,29	5714748,26	336161,66
	Genebrières	33	1035,9	31,39	8381618,96	253988,45
	Monclar de Quercy	46	1734,69	37,71	14078229,74	306048,47
	Puygaillard de Quercy	29	1309,01	45,14	9601306,16	331079,52
Monclar		125	4526,54	140,53	37775903,12	302207,22
	Lamothe-Capdeville	24	453,28	18,89	7959872,29	331661,35
	Léojac	18	448,3	24,91	5365622,55	298090,14
	Montauban	247	7150,09	28,95	97624739,72	395241,86
	Villemade	27	518,06	19,19	7587961,84	281035,62
Montauban		316	8569,73	91,93	118538196,4	375120,87
	Labastide de Penne	16	767,82	47,99	4115415,93	257213,50
	Lapenche	17	798,54	46,97	6062546,34	356620,37
	Montalzat	66	2091,28	31,69	22703221,09	343988,20
	Montpezat de Quercy	64	2360,84	36,89	20863177,16	325987,14
	Puylaroque	27	1509,29	55,90	8600723,65	318545,32
Montpezat		190	7527,77	219,44	62345084,17	328132,02
	Albias	55	1359,23	24,71	23047953,75	419053,70
	Bioule	43	1417,39	32,96	12245036,55	284768,29
	Montricoux	28	1033,89	36,92	5060348,32	180726,73
	Nègrepelisse	95	2726,91	28,70	25058132,65	263769,82
	St-Etienne de Tulmont	35	814,42	23,27	7391009,26	211171,69
	Vaissac	70	2315,08	33,07	14874133,12	212487,62
Nègrepelisse		326	9666,92	179,65	87676613,65	268946,67
	Cazals	7	585,31	83,62	2006951,62	286707,37
	St-Antonin-Noble-Val	52	3499,55	67,30	11118198,02	213811,50
Saint Antonin		59	4084,86	150,91	13125149,64	222460,16
Villebrumier		38	1541,12	40,56	9914646,12	260911,74
TOTAL		1715	60770,08	35,56	533022940,1	310800,55

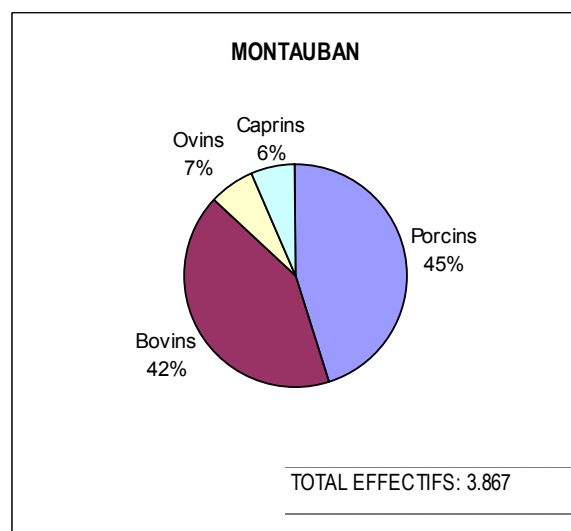
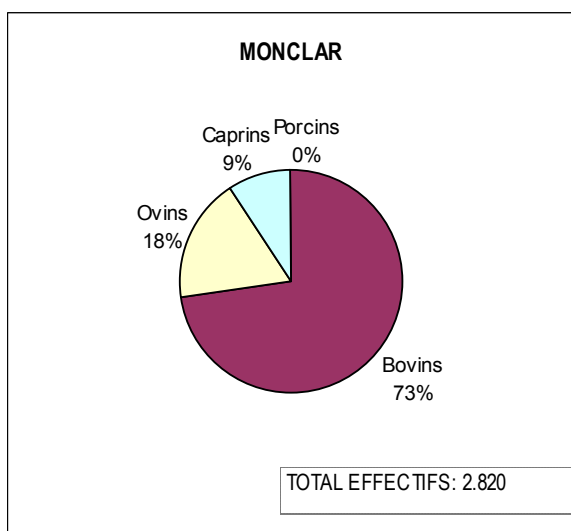
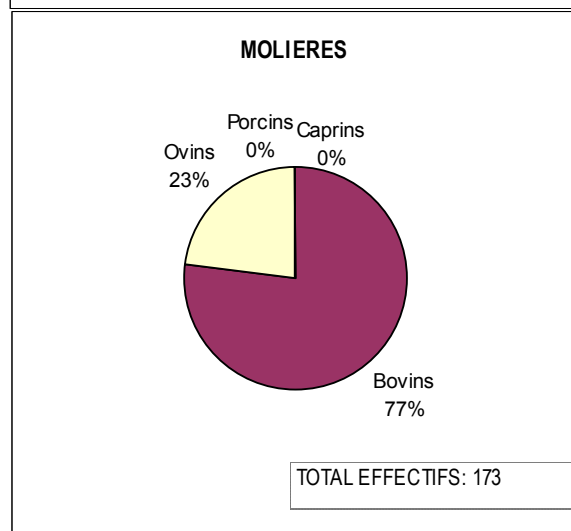
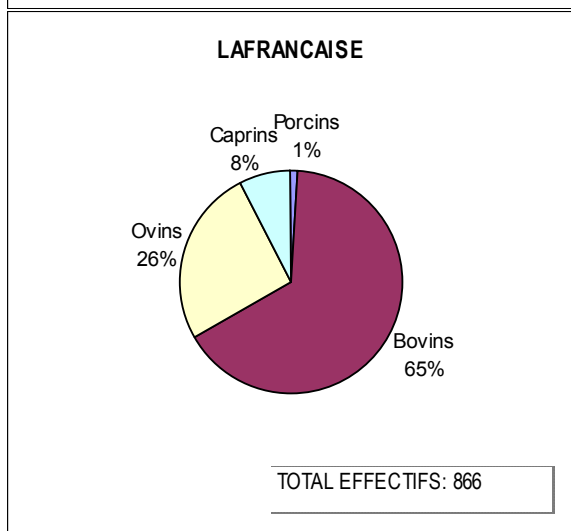
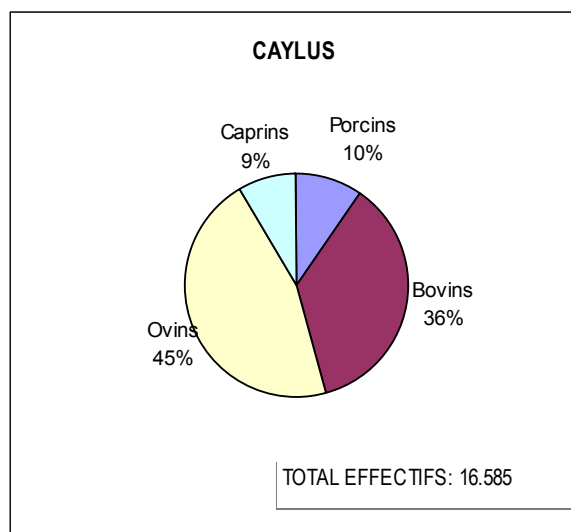
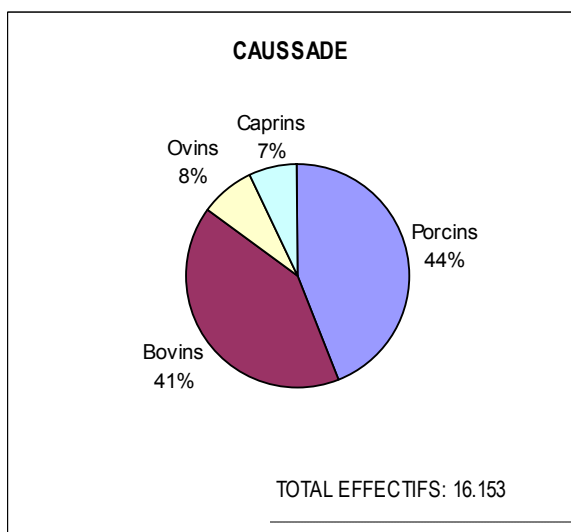
2. Nombre des exploitations par strate de taille dans chaque commune du bassin

CANTON	COMMUNE	STRATES DE TAILLE					TOTAL
		1	2	3	4	5	
Caussade	Caussade	12	6	11	17	19	65
	Cayrac	2	5	0	2	4	13
	Cayriech	3	3	0	3	4	13
	Lavaurette	0	0	4	4	5	13
	Mirabel	15	12	17	10	12	66
	Monteils	5	1	3	1	3	13
	Réalville	6	9	8	15	11	49
	Saint-Cirq	3	5	3	2	11	24
	Septfonds	0	2	2	4	9	17
	St-Georges	0	3	3	5	2	13
	St-Vincent d'Autejac	1	5	12	8	9	35
Caussade		47	51	63	71	89	321
Caylus	Caylus	3	5	3	16	35	62
	La Salvétat Belmontet	6	4	8	8	10	36
	Lacapelle-Livron	0	1	0	1	8	10
	Loze	0	0	0	1	3	4
	Mouillac	0	0	1	0	2	3
	St-Projet	0	4	2	3	7	16
Caylus		9	14	14	29	65	131
Lafrançaise	Lafrançaise	32	21	17	12	11	93
	L'honor de Cos	20	28	16	4	5	73
	Montastruc	6	7	0	3	0	16
	Piquecos	3	4	4	1	1	13
Lafrançaise		61	60	37	20	17	195
Molières	Auty	2	3	4	2	3	14
		2	3	4	2	3	14
Monclar	Bruniquel	2	6	3	4	2	17
	Genebrières	11	5	3	6	8	33
	Monclar de Quercy	2	11	12	11	10	46
	Puygaillard de Quercy	2	4	1	12	10	29
Monclar		17	26	19	33	30	125
Montauban	Lamothe-Capdeville	5	11	2	6	0	24
	Léojac	4	4	6	2	2	18
	Montauban	89	71	36	21	30	247
	Villemade	11	10	2	1	3	27
Montauban		109	96	46	30	35	316
Montpezat	Labastide de Penne	0	5	1	3	7	16
	Lapenche	2	2	2	6	5	17
	Montalzat	4	16	17	20	9	66
	Montpezat de Quercy	5	10	15	21	13	64
	Puylaroque	3	2	5	2	15	27
Montpezat		14	35	40	52	49	190
Nègrepelisse	Albias	18	6	12	15	4	55
	Bioule	9	3	7	15	9	43
	Montricoux	5	5	5	4	9	28
	Nègrepelisse	21	15	20	24	15	95
	St-Etienne de Tulmont	13	6	6	5	5	35
	Vaissac	5	15	19	20	11	70
Nègrepelisse		71	50	69	83	53	326
Saint Antonin	Cazals	2	0	0	1	4	7
	St-Antonin-Noble-Val	1	5	3	18	25	52
Saint Antonin		3	5	3	19	29	59
Villebrumier	St Nauphary	7	7	5	7	12	
		7	7	5	7	12	38
TOTAL		340	347	300	346	382	1715

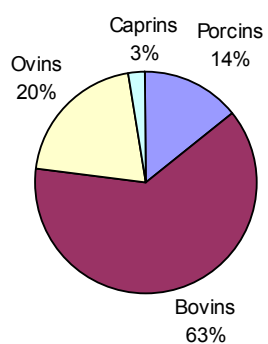
3. Nombre des exploitations de chaque classe par commune

CANTON	COMMUNE	Typologie											
		Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 4	Classe 5	Classe 6	Classe 7	Classe 8	Classe 9	Classe 10	Classe 11	Classe 12
Caussade	Caussade	8	0	20	2	5	0	1	4	1	0	24	0
	Cayrac	0	0	1	0	6	0	2	1	0	0	3	0
	Cayriech	4	0	5	0	0	0	0	0	0	0	4	0
	Lavaurette	2	0	10	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	Mirabel	1	2	14	0	0	1	1	6	1	0	26	14
	Monteils	0	0	4	0	1	0	0	3	0	0	5	0
	Réalville	3	0	5	1	10	0	6	3	0	0	20	1
	Saint-Cirq	1	0	16	0	0	0	0	1	0	0	6	0
	Septfonds	5	0	7	1	0	1	0	0	0	0	3	0
	St-Georges	3	0	5	0	0	0	0	0	0	1	4	0
	St-Vincent d'Autejac	4	0	9	0	5	2	0	3	0	0	12	0
Caussade		31	2	96	4	27	4	10	21	2	1	108	15
Caylus	Caylus	5	2	48	0	0	1	0	0	0	0	6	0
	La Salvetat Belmontet	3	0	7	0	1	0	0	7	1	1	16	0
	Lacapelle-Livron	2	0	7	0	0	0	0	0	0	0	1	0
	Loze	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Mouillac	0	1	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	St-Projet	4	1	9	0	0	0	0	0	0	0	2	0
Caylus		14	4	77	0	1	1	0	7	1	1	25	0
Lafrançaise	Lafrançaise	2	0	10	2	0	0	11	12	4	0	36	16
	L'honor de Cos	1	0	4	0	0	0	2	16	1	1	15	33
	Montastruc	0	0	0	0	0	0	1	3	0	1	6	5
	Piquecos	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	2	9
Lafrançaise		3	0	15	2	0	0	14	31	6	2	59	63
Molières	Auty	0	0	1	0	0	0	0	3	0	0	10	0
Molières		0	0	1	0	0	0	0	3	0	0	10	0
Monclar	Bruniquel	1	0	4	0	0	0	2	2	0	1	5	2
	Genèbrières	3	0	4	0	1	0	0	8	0	0	16	1
	Monclar de Quercy	7	0	9	0	2	0	0	7	1	0	19	1
	Puygaillard de Quercy	6	0	7	0	1	0	2	1	0	1	11	0
Monclar		17	0	24	0	4	0	4	18	1	2	51	4
Montauban	Lamothe-Capdeville	0	0	0	0	0	0	3	5	0	0	10	6
	Léjac	0	0	0	0	2	0	0	5	0	2	7	2
	Montauban	4	1	19	5	3	0	40	38	7	2	74	54
	Villemaude	0	0	1	3	0	0	7	2	3	0	7	4
Montauban		4	1	20	8	5	0	50	50	10	4	98	66
Montpezat	Labastide de Penne	4	0	4	0	0	0	0	1	0	0	7	0
	Lapendhe	4	0	8	0	0	0	0	1	0	0	4	0
	Montalzat	8	1	7	0	4	0	0	9	2	7	27	1
	Montpezat de Quercy	11	0	12	1	0	0	0	6	3	4	23	4
	Puyaroque	5	0	7	0	0	0	2	2	1	2	8	0
Montpezat		32	1	38	1	4	0	2	19	6	13	69	5
Nègrepelisse	Albias	3	1	3	1	3	1	23	4	1	4	8	5
	Bioule	7	0	3	1	5	0	22	0	0	0	5	0
	Montricoux	4	0	13	0	0	0	6	1	0	0	4	0
	Nègrepelisse	8	0	5	0	13	0	40	8	0	0	18	3
	St-Etienne de Tulmont	4	0	4	0	0	1	14	5	2	0	3	2
	Vaissac	19	0	16	0	1	0	7	6	1	1	18	1
Nègrepelisse		45	1	44	2	22	2	112	24	4	5	56	11
Saint Antonin	Cazals	2	0	3	0	0	0	0	0	0	0	2	0
	St-Antonin-Noble-Val	8	2	36	0	0	0	0	0	0	0	6	0
		10	2	39	0	0	0	0	0	0	0	8	0
Villebrunier	St Nauphary	4	0	4	1	5	0	1	5	3	0	15	0
		4	0	4	1	5	0	1	5	3	0	15	0
TOTAL		160	11	358	18	68	7	193	178	33	28	499	164

Distribution des effectifs animaux par canton : nombre total des effectifs et pourcentage de chaque type d'élevage

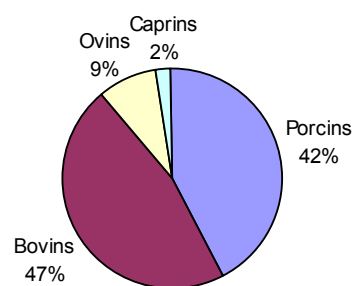


MONTPEZAT



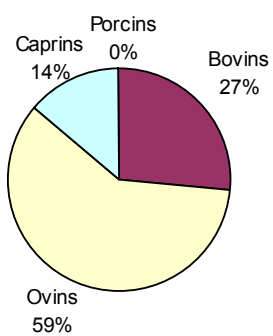
TOTAL EFFECTIFS: 7.207

NEGREPELISSE



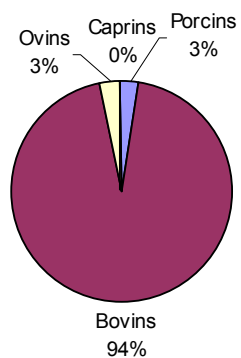
TOTAL EFFECTIFS: 11.267

SAINT ANTONIN



TOTAL EFFECTIFS: 7.194

VILLEBRUMIER



TOTAL EFFECTIFS: 479

Annexe 4

Définition de 3 types d'année

- Année très sèche : 89 ou 90
- Année normal sèche : 98
- Année « humide » : 2002

Définition de 3 types de sol

- Terreforts, argilo-calcaire
- Sols d'alluvions en plaine
- Boulbènes

Détail des éléments technico-économiques pour chaque culture importante par utilisation de l'eau ou grande surface présente sur le bassin. On cherche, quand c'est possible, à regrouper les cultures entre elles.

Culture : **SOJA IRRIGUEE**

- Semence :556 F + inoculation 50 F
- Traitements phytosanitaires :353 F
- Engrais total : 500 F (dont nombre d'unités d'azote : ...0)
- Main d'œuvre (temporaire) :
- Récolte (si fait par une entreprise) :
- Eau

	1990	1998	2002
Terrefort	1500 m ³	2000 m ³	700 m ³
Alluvions	2000 m ³	2500 à 3000 m ³	900 m ³
Boulbènes	3500 m ³	4000 m ³	1200 m ³

Coût de l'eau : 50 cts/m³ (40 cts pour l'eau et 10 cts de charges fixes)

⇒ Total de produit brut : ➤ rendement $q^x \times 700 \text{ F} + 3421 \text{ F}$ (prime)

Eventuellement, charges supplémentaires :

Rendement	Maxi	Moyen	Mini
Terrefort	35 q	20 q	15 q
Alluvions	40 q	30 q	20 q
Boulbènes	30 q	25 q	15 q

Culture : **SORGHO IRRIGUEE**

- Semence :600 F
- Traitements phytosanitaires :430 F
- Engrais total : ...950 F (dont nombre d'unités d'azote : ...0)
- Main d'œuvre (temporaire) :
- Récolte (si fait par une entreprise) :500 F....Séchage : 40 F/tonne
- Eau (~2 tours)

	1990	1998	2002
Terrefort	1000 m ³	700 m ³	350 m ³
Alluvions	1500 m ³	1000 m ³	450 m ³
Boulbènes	1500 m ³	1200 m ³	600 m ³

Coût de l'eau : 50 cts/m³ (40 cts pour l'eau et 10 cts de charges fixes)

⇒ Total de produit brut /T : 7827 F (prime PAC incluse) ➤ $72 \text{ q}^x \times 63 \text{ F} + 3228 \text{ F}$ (prime irrigué)
 Eventuellement, charges supplémentaires :

Rendement irrigué	Maxi	Moyen	Mini
Terrefort	100 q	80 q	60 q
Alluvions	100 q	80 q	60 q
Boulbènes	90 q	70 q	50 q

Rendement non irrigué	Maxi	Moyen	Mini
Terrefort	100 q	75 q	50 q
Alluvions	100	75 q	50 q
Boulbènes	90 q	50 q	35 q

Mais seulement 120 unités d'azote hectare pour un engrais total de 700 F et prime PAC de 2025 F

Culture : TOURNESOL SEMENCES

- Semence :650 F
- Traitements phytosanitaires :650 F + fongicide ~ 200 F = 850 F
- Engrais total : ...700 F (dont nombre d'unités d'azote : ...70 unités)
- Main d'œuvre (temporaire) :30 heures/ha et 54 F/heure pour un emploi temporaire, charges comprises (8,20 €/h) ➤ 1600 F/ha
- Récolte (si fait par une entreprise) :500 F
- Eau (~2 tours) : 700 m³
Coût de l'eau : 50 cts/m³ (40 cts pour l'eau et 10 cts de charges fixes)

⇒ Total de produit brut /T :
 Eventuellement, charges supplémentaires :

Rendement	Maxi	Moyen	Mini
Terrefort			
Alluvions			
Boulbènes			

Culture : TOURNESOL NON IRRIGUE

- Semence :650 F
- Traitements phytosanitaires :650 F (1 parcelle sur 3 réalise un fongicide ~ 195 F)
- Engrais total : ...700 F (dont nombre d'unités d'azote : ...70)
- Main d'œuvre (temporaire) :
- Récolte (si fait par une entreprise) :500 F

⇒ Total de produit brut /T : 5720 F (prime PAC incluse) ➤ $20 \text{ q}^x \times 157 \text{ F} + 2581 \text{ F}$ (prime)
 Eventuellement, charges supplémentaires :

Rendement	Maxi	Moyen	Mini
Terrefort	30 q	20 q	15 q
Alluvions	30 q	20 q	15 q
Boulbènes	25 q	17 q	15 q

Culture : BLE TENDRE NON IRRIGUE

- Semence :400 F (variations de 140 à 700 F selon si blé traité ou pas)
- Traitements phytosanitaires :800 F
- Engrais total : ...900 F (dont nombre d'unités d'azote : ...185 unités, de 2 à 4 apports) – derrière protéagineux, on diminue de 30 unités d'azote
- Main d'œuvre (temporaire) :
- Récolte (si fait par une entreprise) :500 F

⇒ Total de produit brut /T : 6530 F (prime PAC incluse) ➤ $65 \text{ q}^x \times 70 \text{ F} + 1979 \text{ F}$ (prime)

Eventuellement, charges supplémentaires :

Rendement	Maxi	Moyen	Mini
Terrefort	80 q	65 q	50 q
Alluvions	80 q	65 q	50 q

Culture : BLE DUR NON IRRIGUE

- Semence :600 F
- Traitements phytosanitaires :1053 F
- Engrais total : ...1000 F (dont nombre d'unités d'azote : ...230 unités) – derrière protéagineux, on diminue de 30 unités d'azote
- Main d'œuvre (temporaire) :
- Récolte (si fait par une entreprise) :500 F

⇒ Total de produit brut /T : 90 F / q^x ➤ prime 3750

Eventuellement, charges supplémentaires :

Rendement	Maxi	Moyen	Mini
Terrefort	60 q	50 q	40 q
Alluvions	60 q	50 q	40 q

Culture : BLE AMELIORANT DE FORCE NON IRRIGUE

- Semence :500 F (variations de 135 à 785 F)
- Traitements phytosanitaires :950 F
- Engrais total : ...950 F (de 500 à 1250 F) (dont nombre d'unités d'azote : ...210 unités, jusqu'à 5 apports)
- Main d'œuvre (temporaire) :
- Récolte (si fait par une entreprise) :500 F

⇒ Total de produit brut /T : 7678 F (prime PAC incluse)

Eventuellement, charges supplémentaires :

Rendement	Maxi	Moyen	Mini
Terrefort	80 q	65 q	50 q
Alluvions	80 q	65 q	50 q

Culture : FEVEROLE IRRIGUEE

- Semence :.....250 F
- Traitements phytosanitaires :.... 600 F
- Engrais total :...350
- Main d'œuvre (temporaire) :.....
- Récolte (si fait par une entreprise) :
- Eau

	1998	2002
Terrefort	300 m ³	300 m ³
Alluvions	300 m ³	300 m ³

Coût de l'eau : 50 cts/m³ (40 cts pour l'eau et 10 cts de charges fixes)

⇒ Total de produit brut /T : idem pois ➤ 6787 F (prime PAC incluse)

Eventuellement, charges supplémentaires :

	Rendement
Terrefort	20 à 35 q
Alluvions	20 à 35 q

Culture : POIS IRRIGUEE

- Semence :.....250 F en semence fermière traitée (si semence achetée = 700 F/ha)
- Traitements phytosanitaires :.... 800 F (2300 F en pois semences)
- Engrais total :...350 F (dont nombre d'unités d'azote :...0)
- Main d'œuvre (temporaire) :.....
- Récolte (si fait par une entreprise) :500 F.....Séchage : 40 F/tonne
- Eau (~1 passage éventuellement)

	2002
Terrefort	400 m ³
Alluvions	400 m ³
Boulbènes	400 m ³

Coût de l'eau : 50 cts/m³ (40 cts pour l'eau et 10 cts de charges fixes)

⇒ Total de produit brut /T : 6787 F (prime PAC incluse) ➤ 32 q^x x 96 F + 37151 F (prime)

Eventuellement, charges supplémentaires :

Rendement	Maxi	Moyen	Mini
Terrefort	50 q	30 q	20 q
Alluvions	50 q	30 q	20 q

Culture : CERISIER IRRIGUE

- Coût plantation :.....80000 F
- Traitements phytosanitaires :.... 3000 F
- Engrais total :...3000 F (dont nombre d'unités d'azote :...150 unités)
- Main d'œuvre (temporaire) :.....20000 F (100 h de taille)
- Récolte (si fait par une entreprise) :110000 F (2000 h/ha pour 20 t ; 10 kg/h)
- Eau

	1990	1998	2002
Terrefort	1250 m ³	700 m ³	500 m ³
Alluvions	1500 m ³	1000 m ³	500 m ³
Boulbènes	1375 m ³	875 m ³	500 m ³

Coût de l'eau : 50 cts/m³ (40 cts pour l'eau et 10 cts de charges fixes)

⇒ Total de produit brut /T : 200000 F (prime PAC incluse)

Eventuellement, charges supplémentaires :

Remarque : coût de main d'œuvre = charge la plus important d'où arrêt de la récolte si prix < 10 F/kg

Rendement : indépendant des terrains ➤ de 15 à 20 t/ha

Culture : **PRUNE / PECHE (IRRIGUE)**

- Coût plantation :80000 F
- Traitements phytosanitaires :4000 F
- Engrais total : ...2500 F (dont nombre d'unités d'azote : _100 unités)
- Main d'œuvre (temporaire) :30000 F (700 h pour 25 tonnes, compter 35 kg récolté / h)
- Récolte (main d'œuvre) :500 F Séchage : 40 F/tonne
- Eau

Année	sèche	normale	humide
Terrefort	3500 m ³	1500 m ³	500 m ³
Alluvions	4000 m ³	2000 m ³	1000 m ³
Boulbènes	3750 m ³	1750 m ³	750 m ³

Coût de l'eau : 50 cts/m³ (40 cts pour l'eau et 10 cts de charges fixes)

⇒ Total de produit brut /T : 80000 F (prime PAC incluse)

Eventuellement, charges supplémentaires :

Rendement irrigué	Maxi	Moyen	Mini
Reine-Claude	30 q	25 q	20 q
Japonaises	40 q	35 q	30 q

Prix de vente : Reine-Claude 3^F20, japonaise 3^F

Culture : **POMME IRRIGUEE**

- Coût plantation :150000 F tous les 15 ans
- Traitements phytosanitaires :9000 F
- Engrais total : ...1800 F (dont nombre d'unités d'azote : _140 unités)
- Main d'œuvre (temporaire) :34000 F (120 h de taille + 100 h d'éclaircissage)
- Récolte (main d'œuvre) :40000 F (420 h de récolte pour 50 tonnes) 0,8 F / kg
- Eau

	sèche	normale	humide
Terrefort	4500 m ³	2500 m ³	1500 m ³
Alluvions	5000 m ³	3000 m ³	2000 m ³
Boulbènes	4750 m ³	2750 m ³	1750 m ³

Coût de l'eau : 50 cts/m³ (40 cts pour l'eau et 10 cts de charges fixes)

⇒ Total de produit brut /T : 100000 F (prime PAC incluse)

Eventuellement, charges supplémentaires :15000 F (charges de structure)

Rendement (Golden)	Maxi	Moyen	Mini
Terrefort	55 q	50 q	45 q
Alluvions	77 q	70 q	63 q
Boulbènes	44 q	40 q	36 q

Culture : MELON IRRIGUE PLEIN CHAMP NON COUVERT

- Plants : ...11000 F + paillage : 1800 F
- Traitements phytosanitaires : ...3500 F (de 3000 à 4000 F)
- Engrais total : ...2500 à 3000 F (dont nombre d'unités d'azote : ...100 unités)
- Main d'œuvre (temporaire) : ...plantation 20 h
- Récolte (si faite par une entreprise) : ...250 h (- heures producteur 50 h)
- Eau

	1990	1998	2002
Terrefort	3500 m ³	3000 m ³	2000 m ³

Coût de l'eau : 50 cts/m³ (40 cts pour l'eau et 10 cts de charges fixes)

⇒ Total de produit brut : 60000 F (de 45000 à 75000 F pour 20 t/ha récoltés)

Eventuellement, charges supplémentaires :

Rendement moyen : 20 tonnes

Culture : MAIS SEMENCES

- Semence :1400 F
- Traitements phytosanitaires : ...1200 F
- Engrais total : ...1300 F (dont nombre d'unités d'azote : ...180 unités à 3,50 F/kg)
- Main d'œuvre (temporaire) : ...40 h (machine) à 120 h (sans machine) ; on se base sur 50 h mécanisées et un équivalent de coût de mécanisation correspondant à 25 h de main d'œuvre
- Récolte (si faite par une entreprise) :600 F + effeuillage 10 h
- Eau

	1990	1998	2002
Terrefort	2000 m ³	1400 m ³	700 m ³
Alluvions	3000 à 2500 m ³	2000 m ³	900 m ³
Boulbènes	4000 m ³	2500 m ³	1200 m ³

Coût de l'eau : 50 cts/m³ (40 cts pour l'eau et 10 cts de charges fixes)

⇒ Total de produit brut /ha : 23000 à 24000 F (prime PAC incluse)

Culture : MAIS GRAIN / MAIS ENSILAGE

- Semence :1100 F
- Traitements phytosanitaires : ...650 F ; passage à 700 F pour surcoût suite interdiction atrazine
- Engrais total : ...1200 F (dont nombre d'unités d'azote : ...200 unités)
- Main d'œuvre (temporaire) :
- Récolte (si faite par une entreprise) :600 F + effeuillage 10 h
- Eau

	1990	1998	2002
Terrefort	2000 m ³	1400 m ³	700 m ³
Alluvions	3000 à 2500 m ³	2000 m ³	900 m ³
Boulbènes	4000 m ³	2500 m ³	1200 m ³

Coût de l'eau : 50 cts/m³ (40 cts pour l'eau et 10 cts de charges fixes)

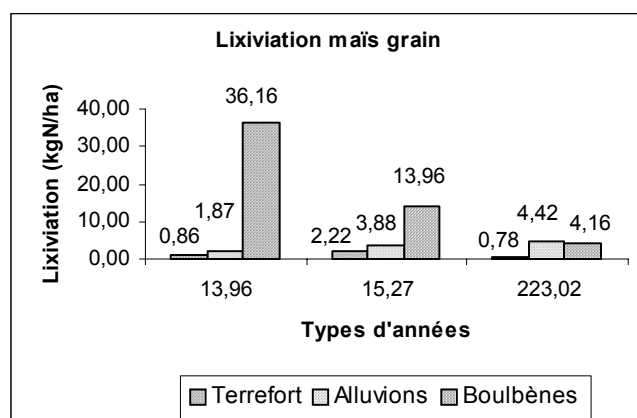
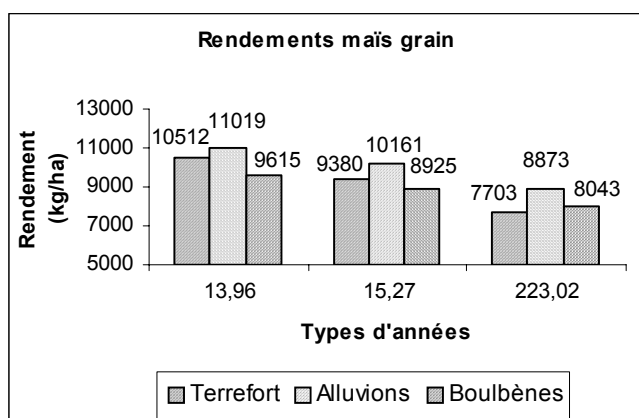
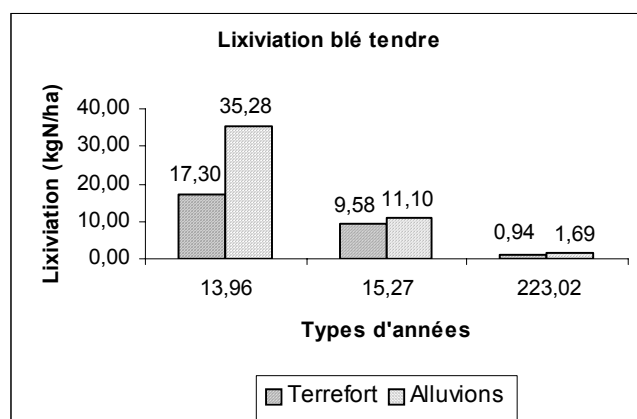
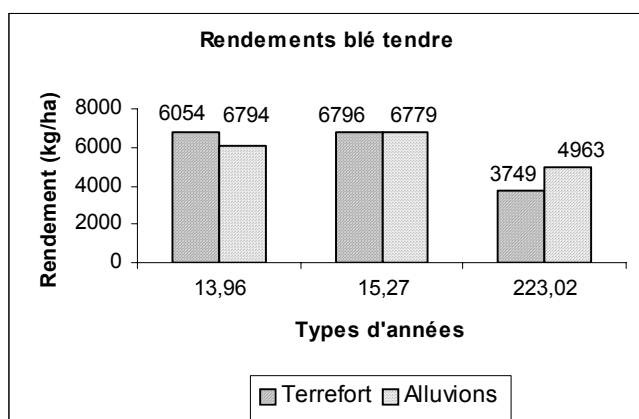
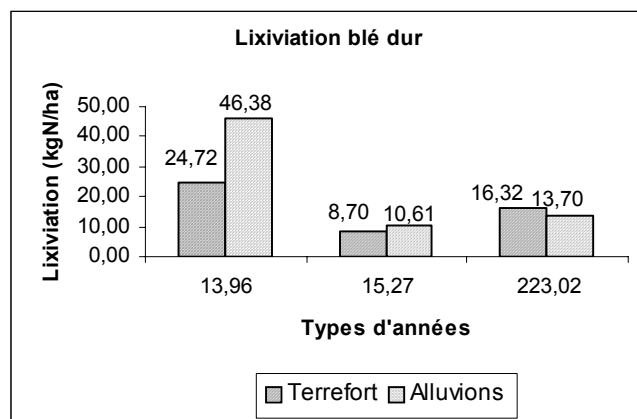
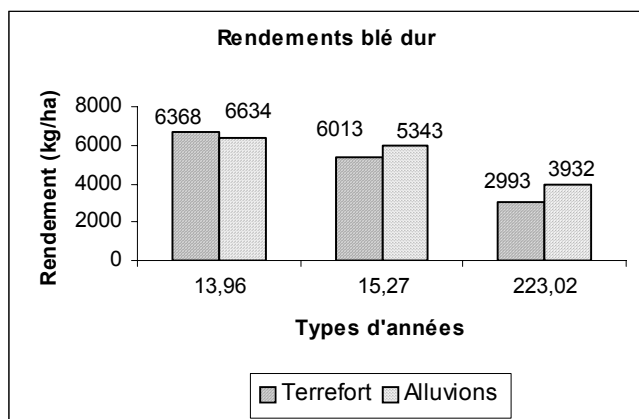
⇒ Total de produit brut / T : 700 F / T (prime PAC incluse) à rajouter séchage : 80 F/T, transport 50 F/T et taxe 20 F/T ➤ soit un total de 150 F/T

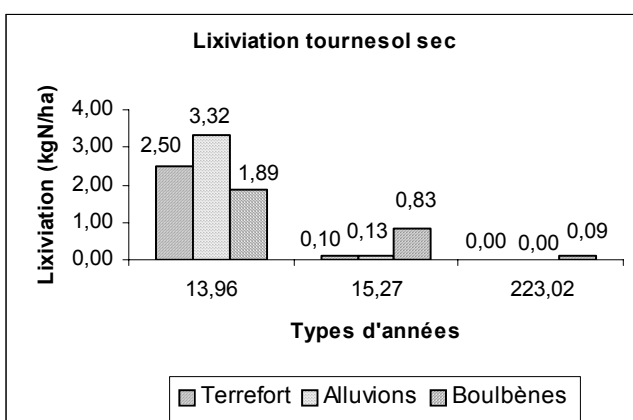
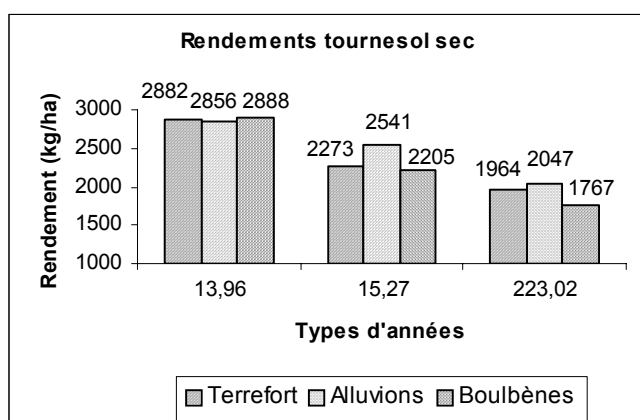
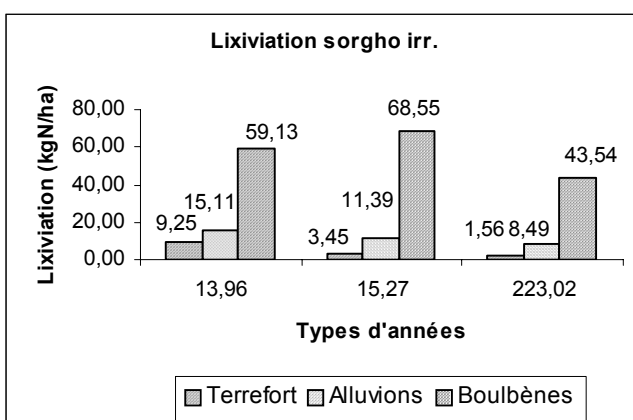
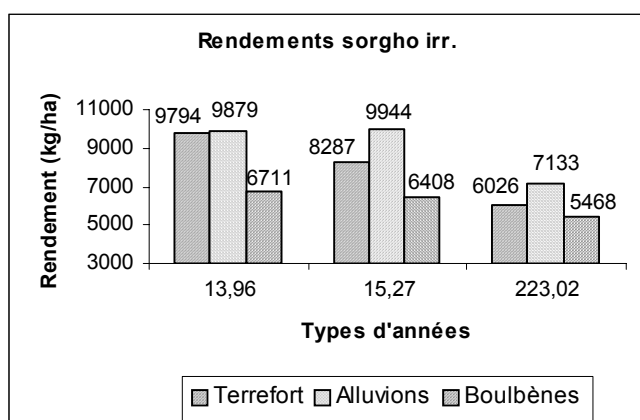
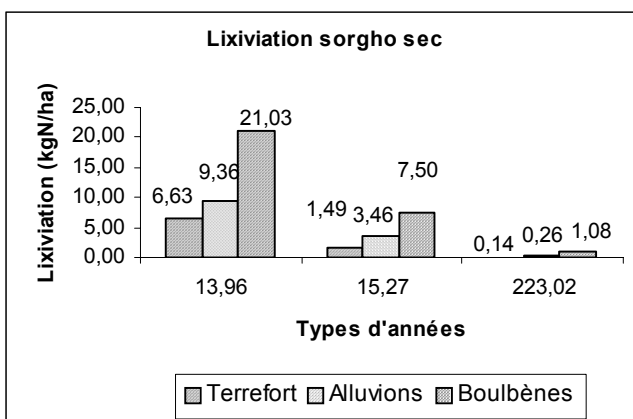
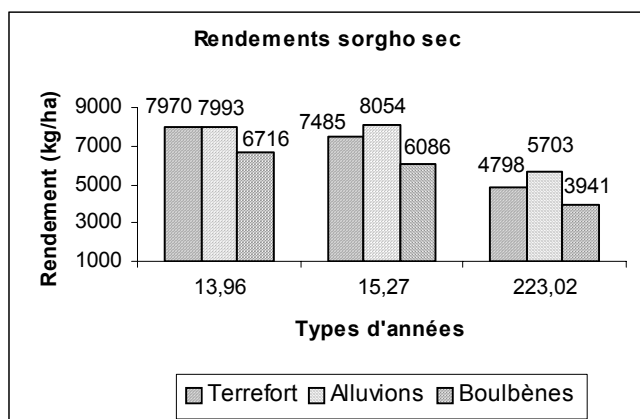
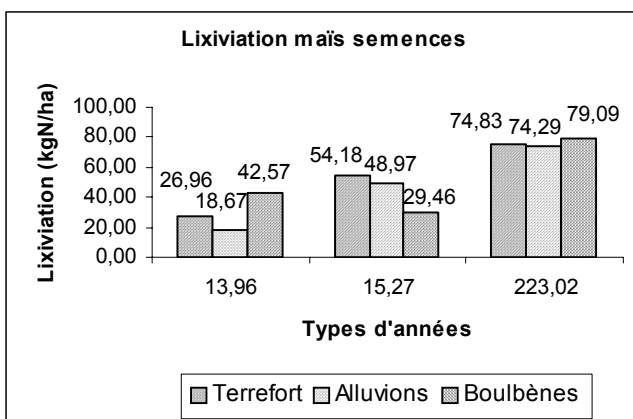
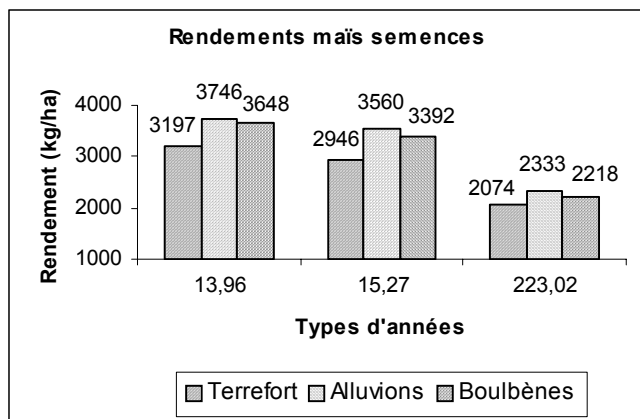
Eventuellement, charges supplémentaires :

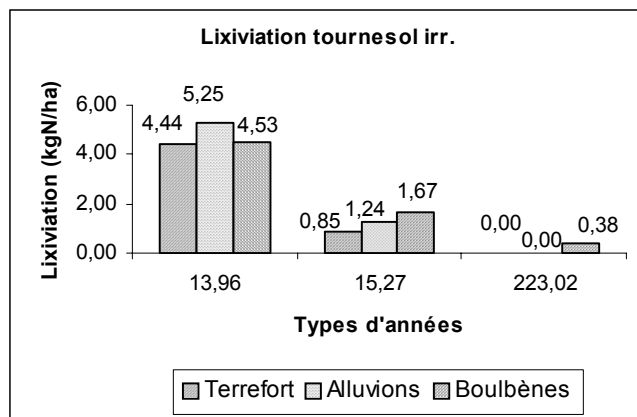
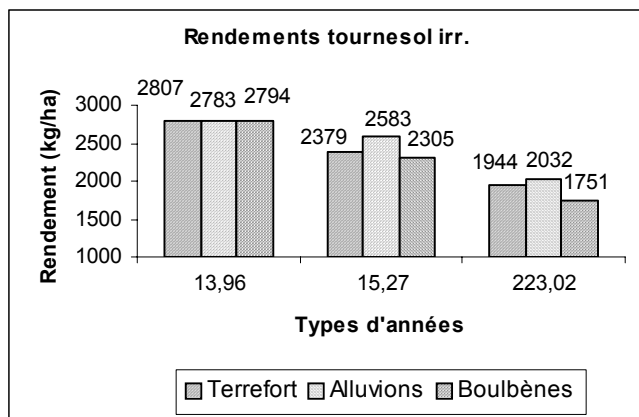
	Rendement
Terrefort	90 q
Alluvions	110 q
Boulbènes	100 q

Annexe 5

Valeurs des rendements et lixiviation des nitrates obtenues comme résultats des simulations avec CROPSYST par culture, type de sol et type d'année avec les itinéraires techniques actuelles



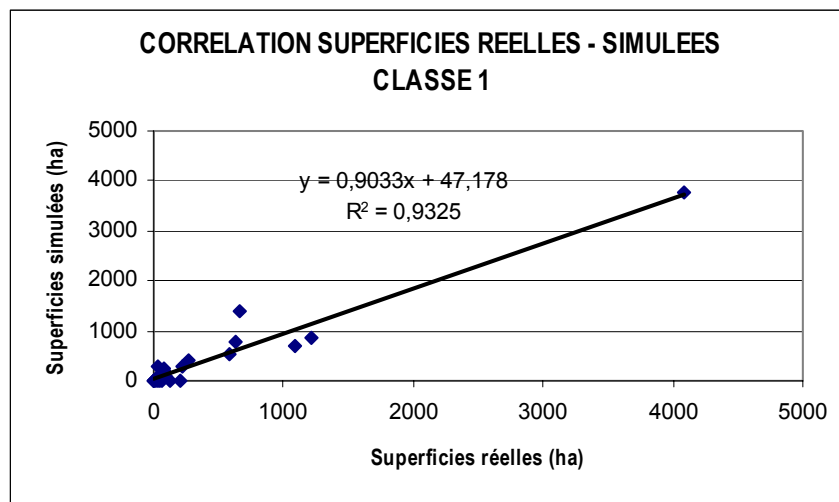




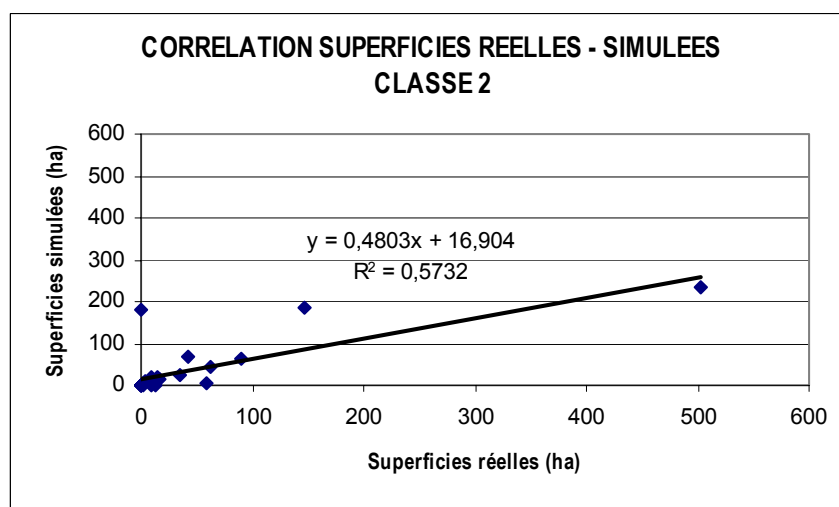
Annexe 6

Résultats du calage du modèle OLYMPE : corrélation entre superficie cultures sorties du modèle et superficies réelles par classe de production

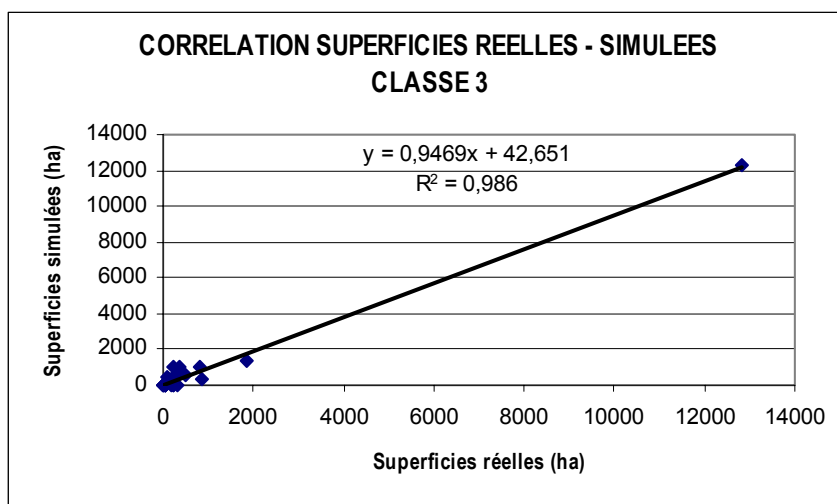
1. Classe 1 : éleveurs bovin lait , maïs ensilage



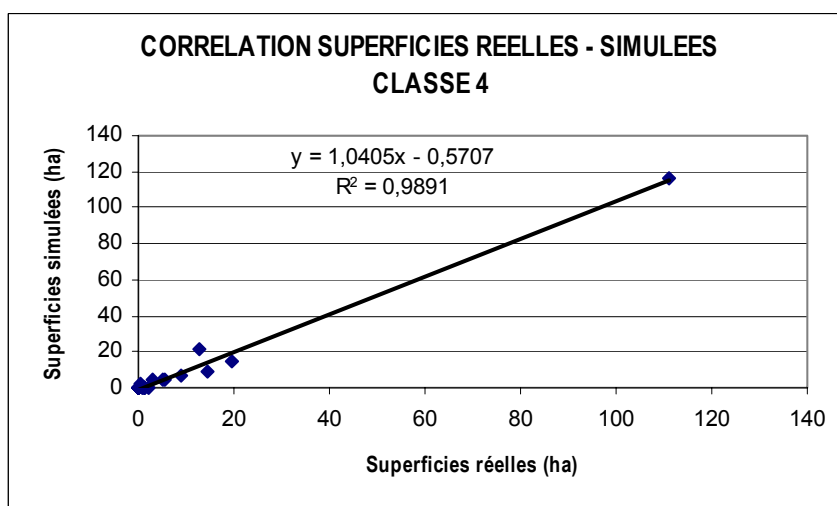
2. Classe 2 : éleveurs volaille



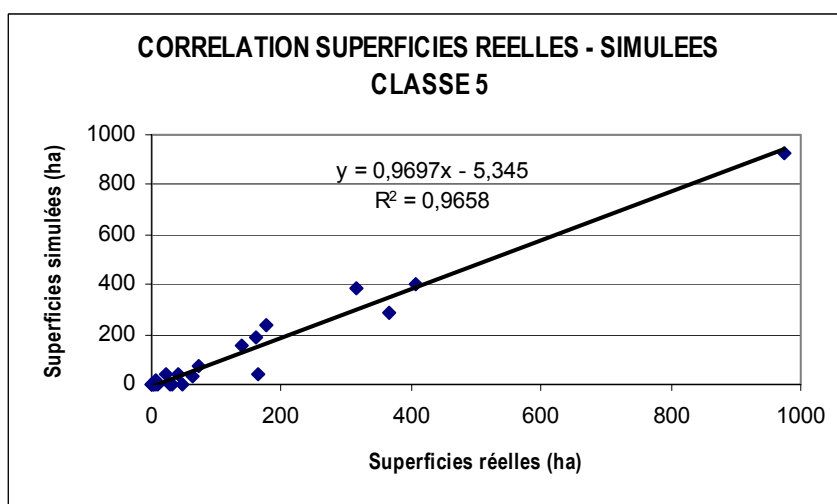
3. Classe 3 : éleveurs bovin



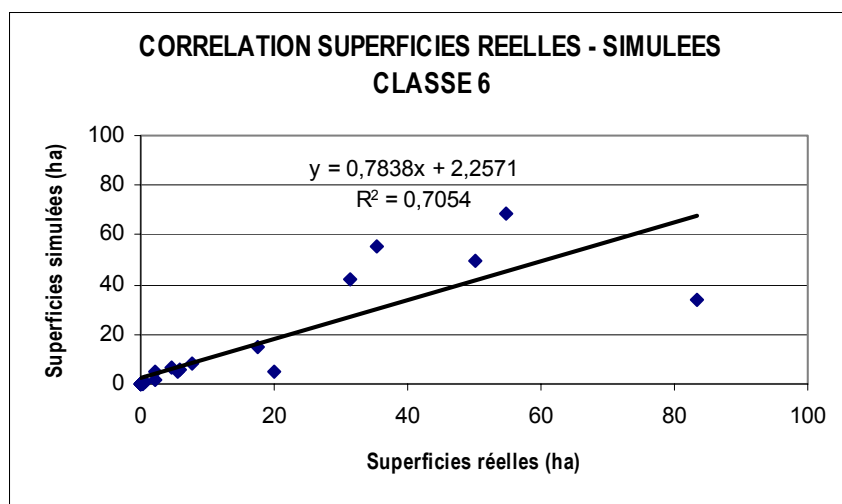
4. Classe 4 : céréales irrigués



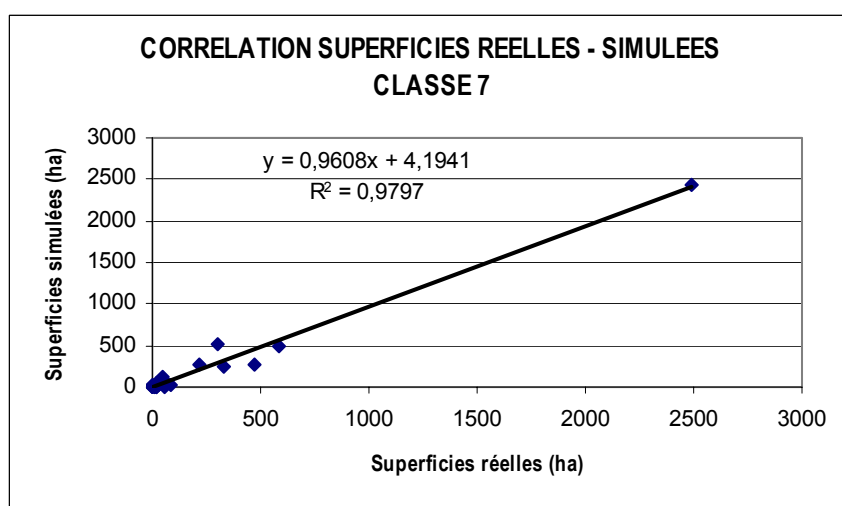
5. Classe 5 : maïs semence



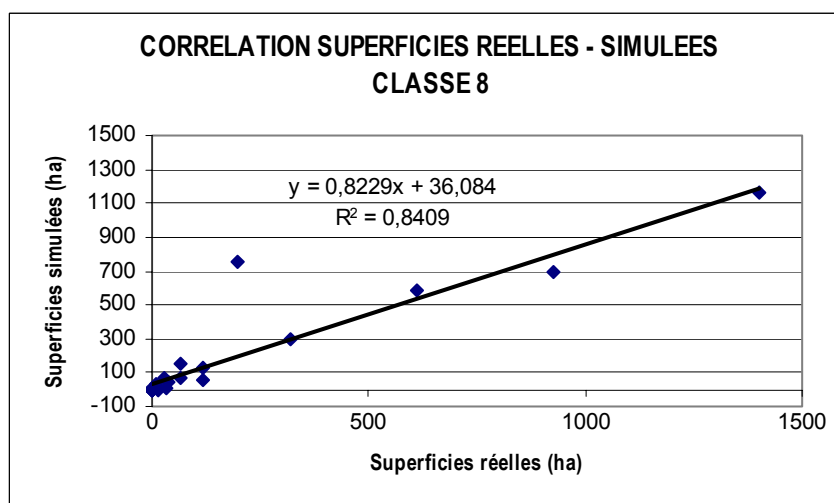
6. Classe 6 : éleveurs porcin



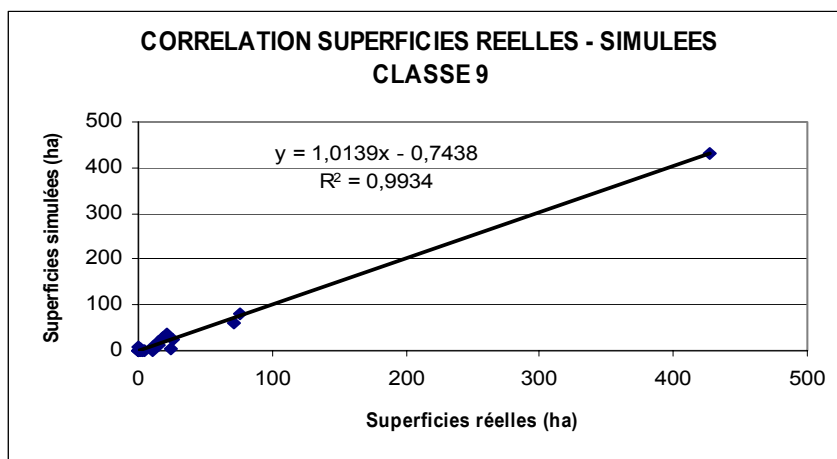
7. Classe 7 : grandes cultures, maïs grain



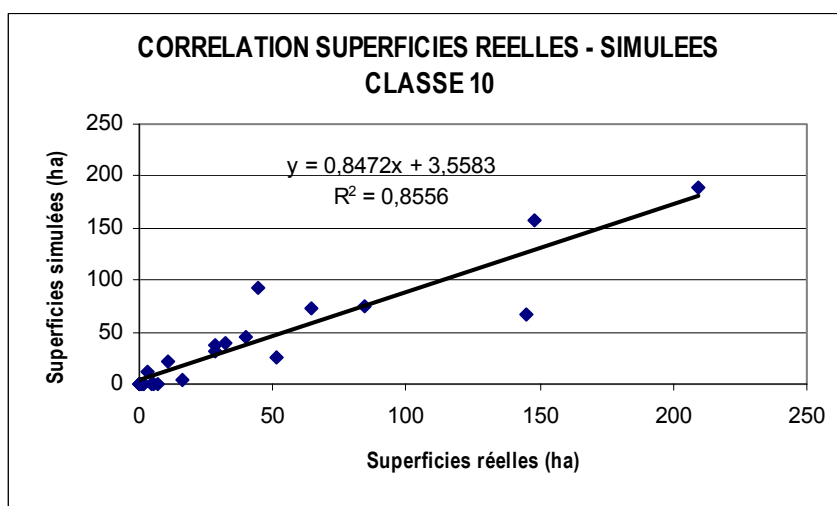
8. Classe 8 : oléagineux non irrigué



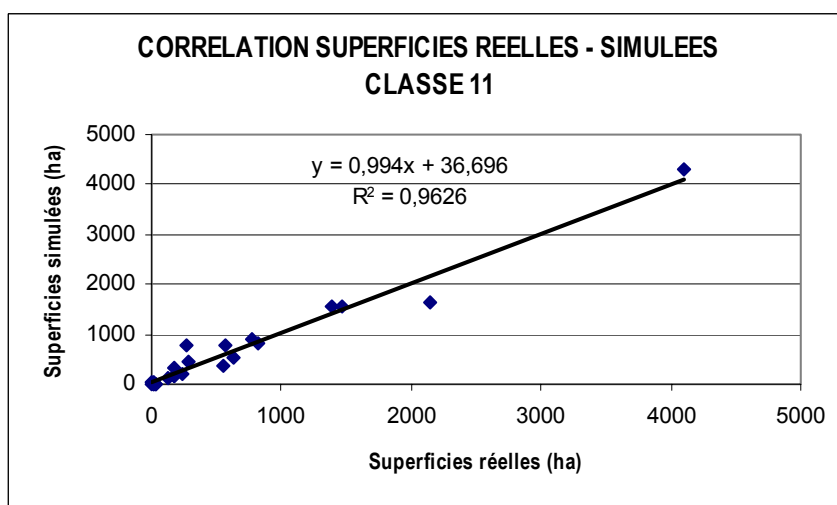
9. Classe 9 : maraîchères



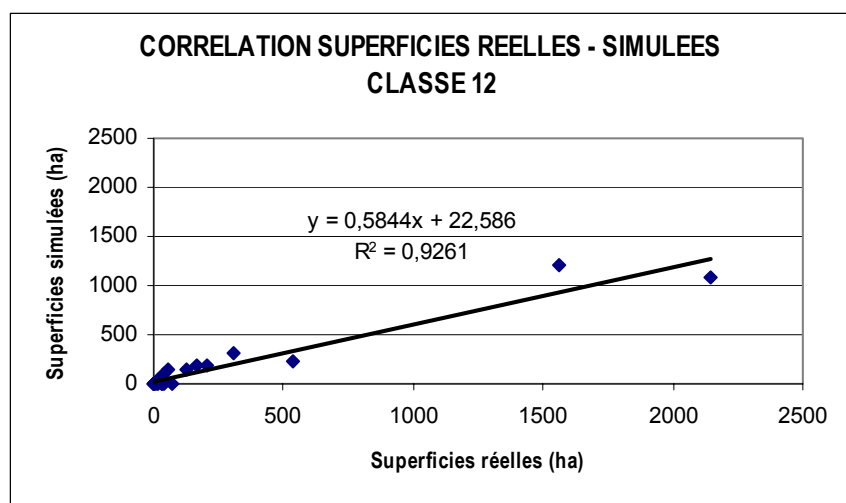
10. Classe 10 : viticulteurs



11. Classe 11 : polyculture



12. Classe 12 : arboriculteurs

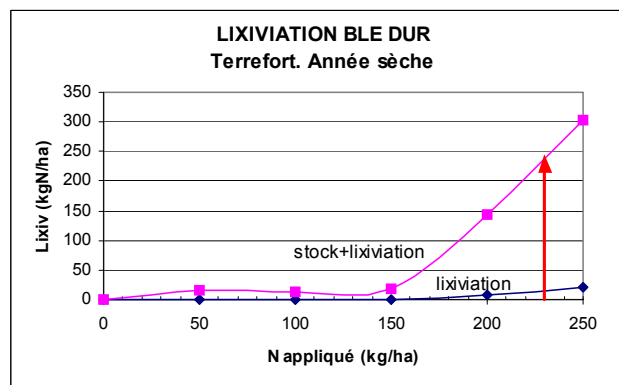
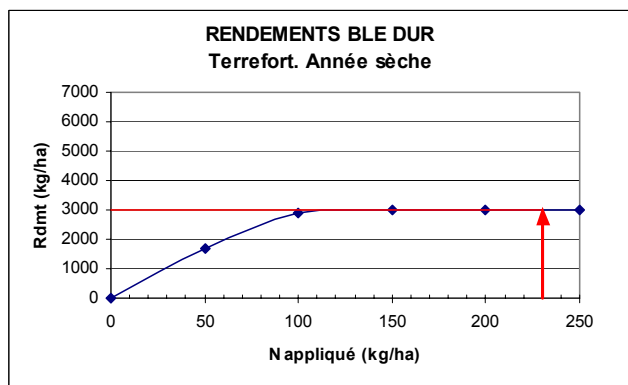
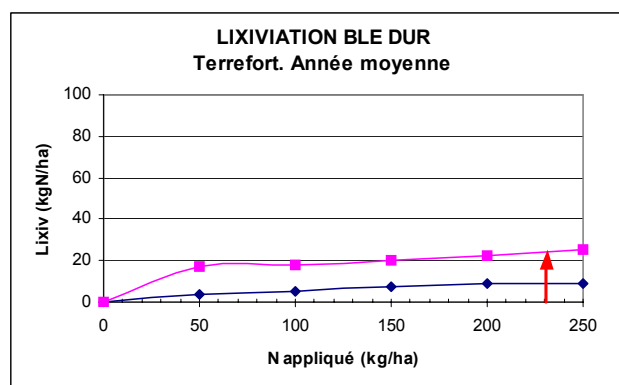
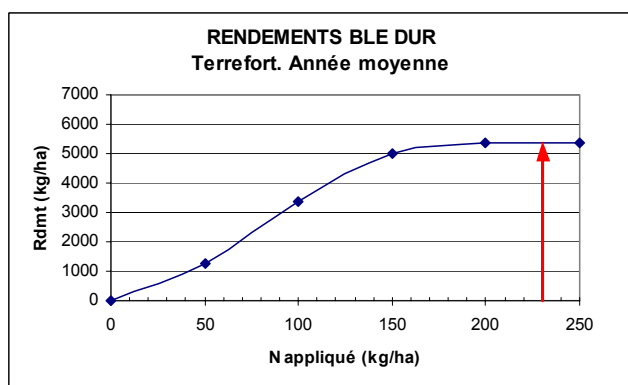
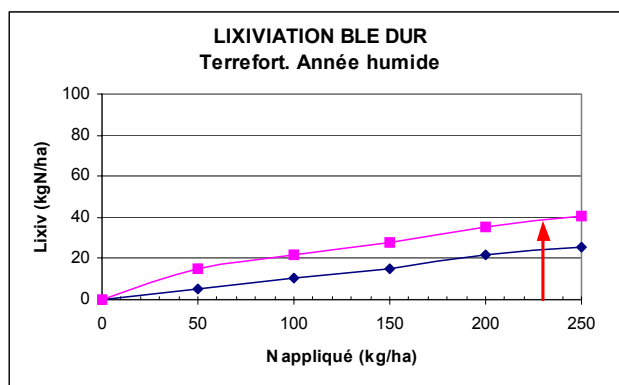
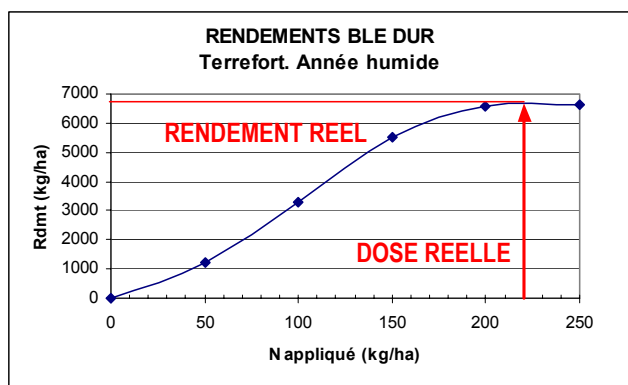


Annexe 7

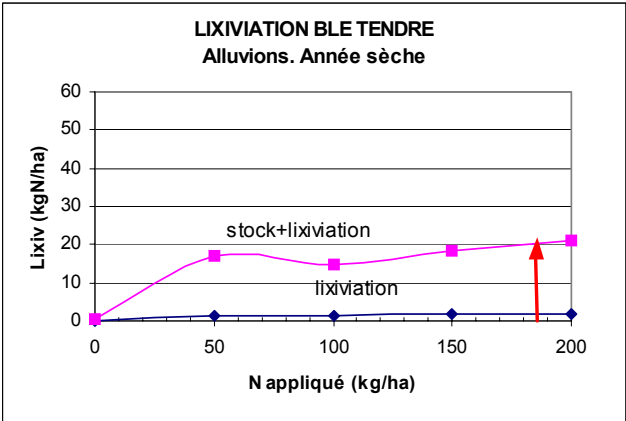
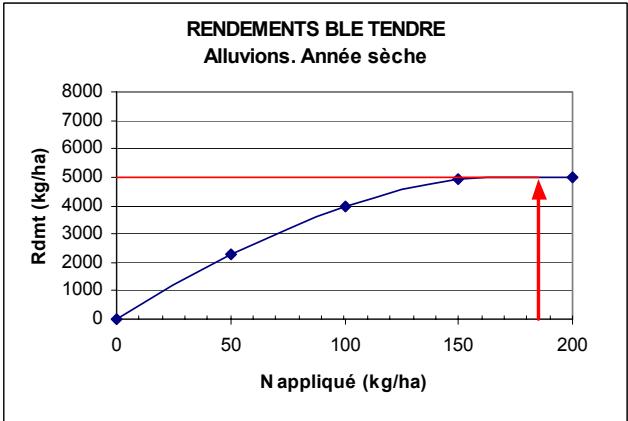
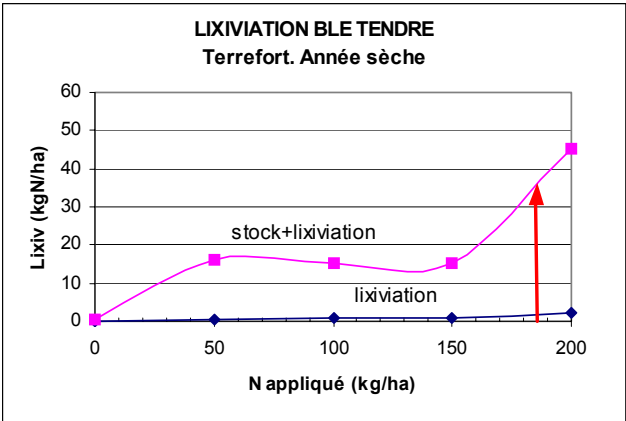
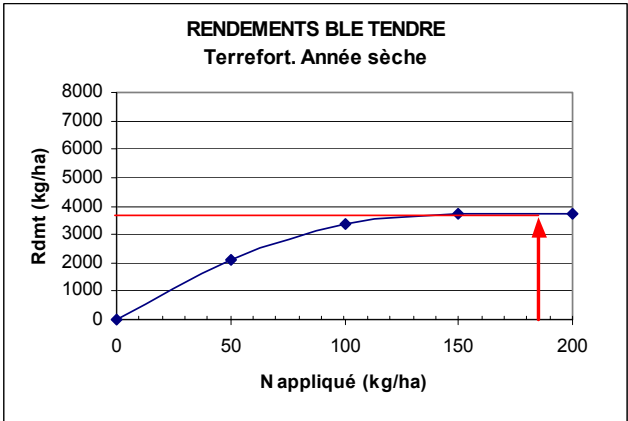
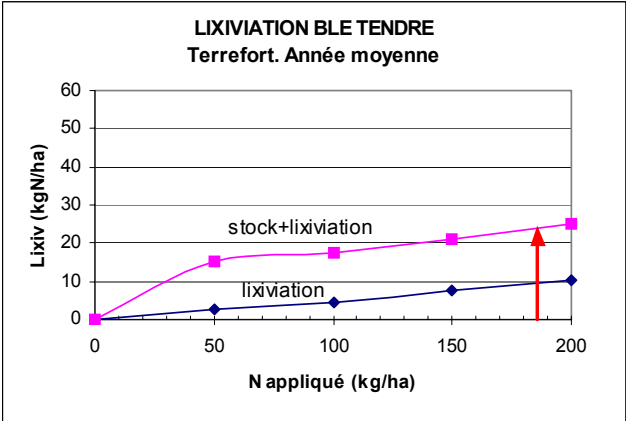
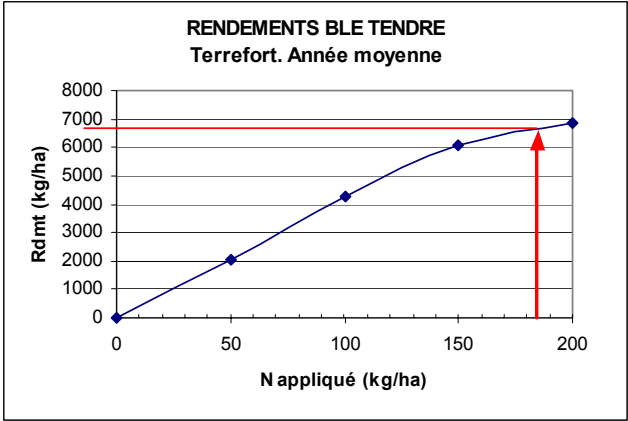
Scénario 1 : Courbes de réponse des cultures aux doses croissantes de fertilisants et optimisation des doses d'irrigation à partir de CROPSYST et comparaison avec les doses d'intrants et les rendements réels

A. Cultures en sec

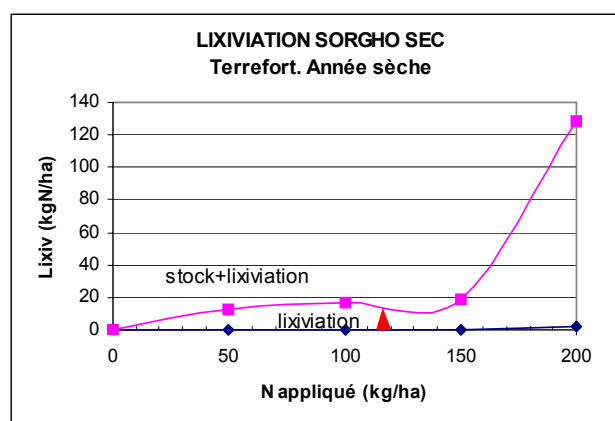
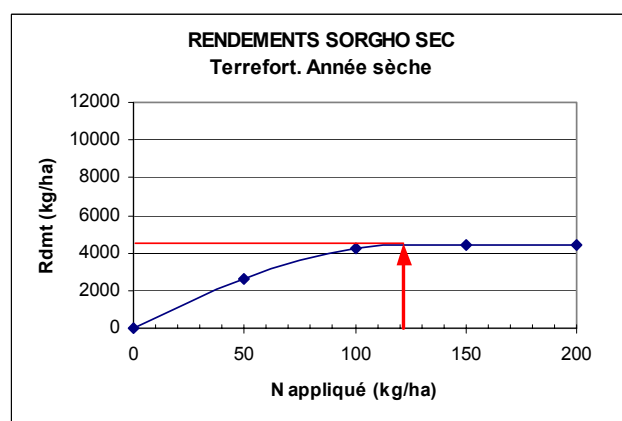
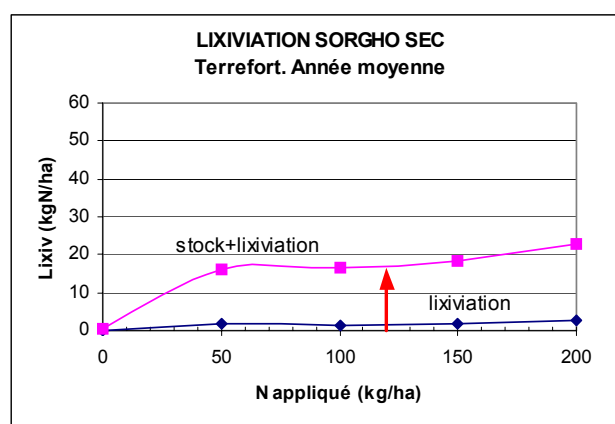
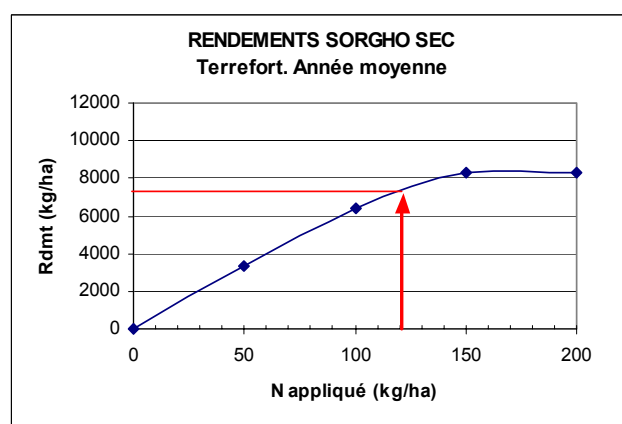
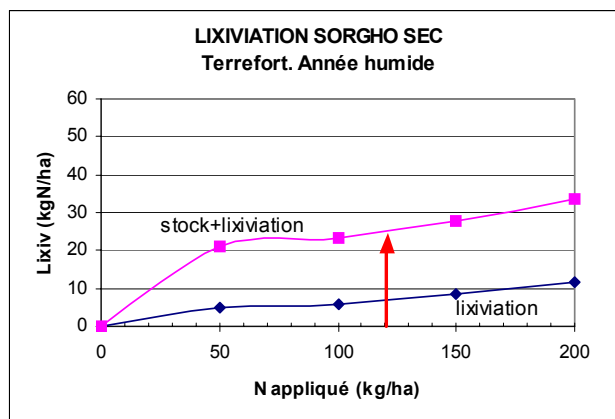
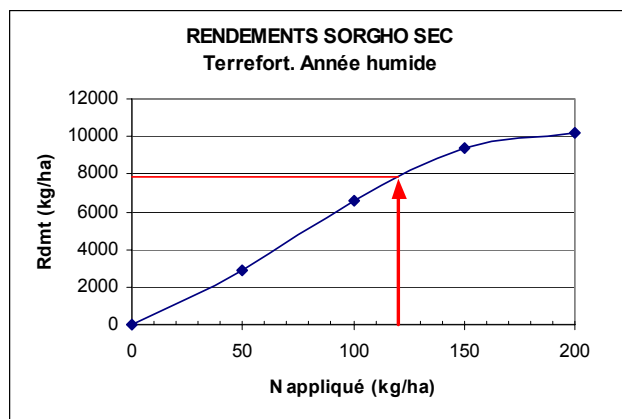
Blé dur

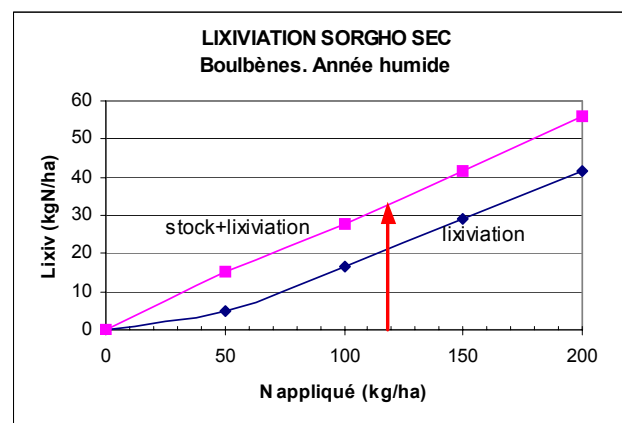
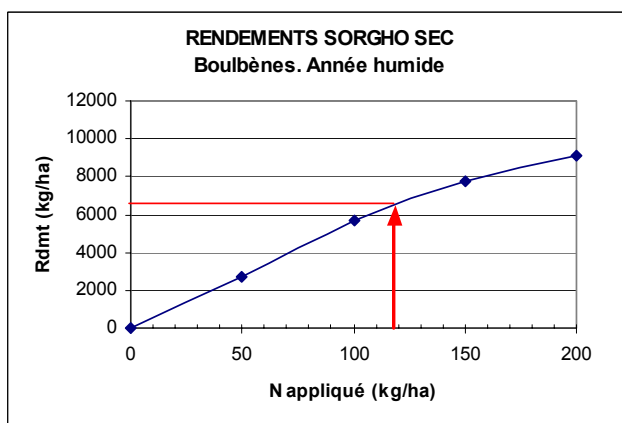
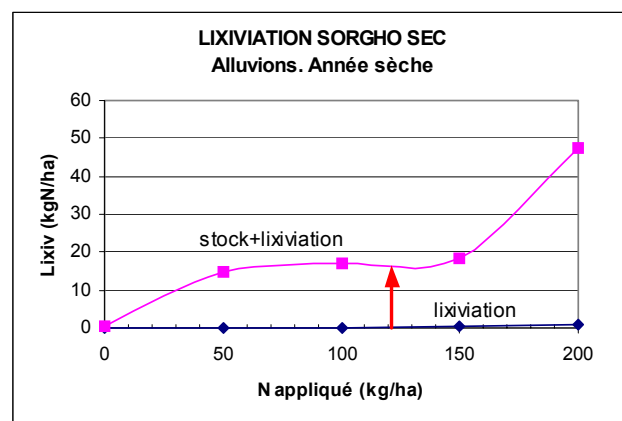
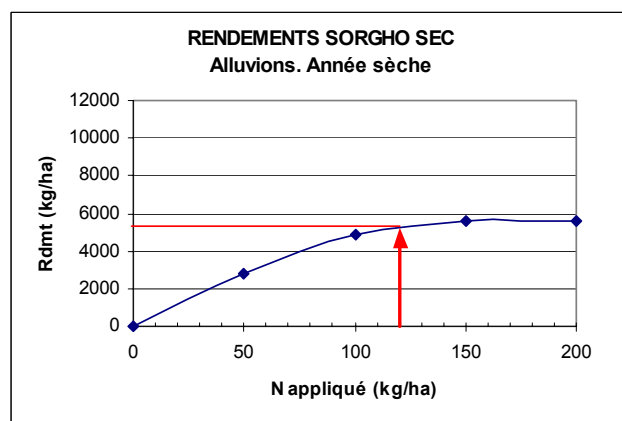
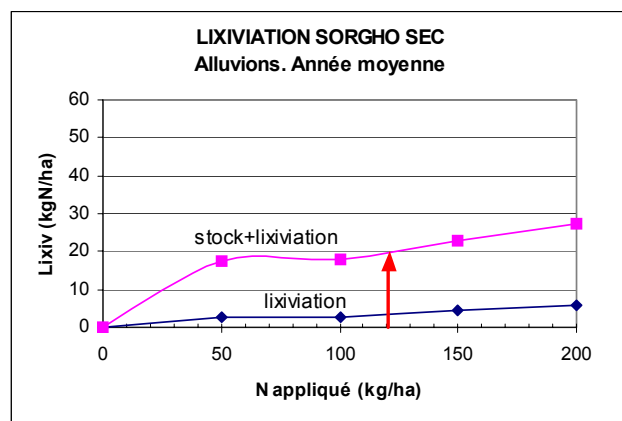
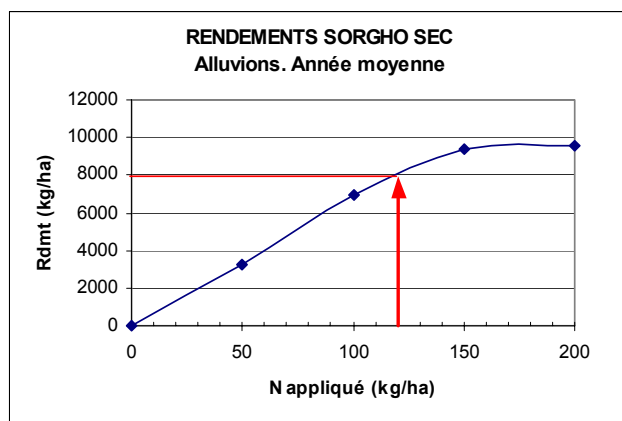
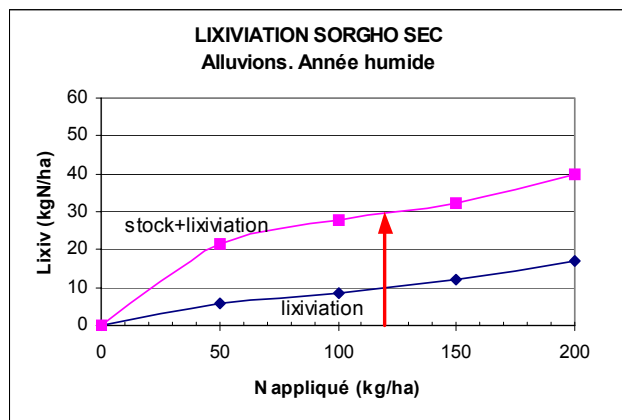
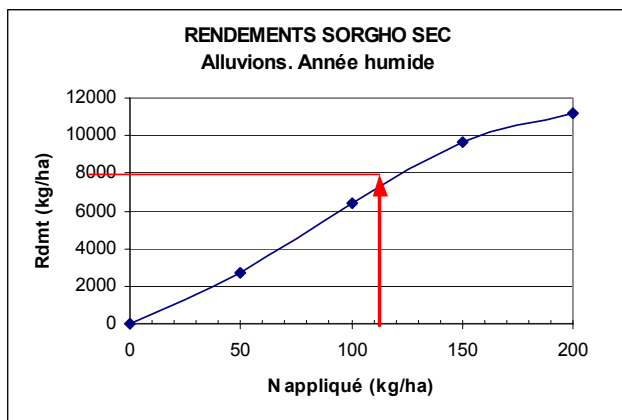


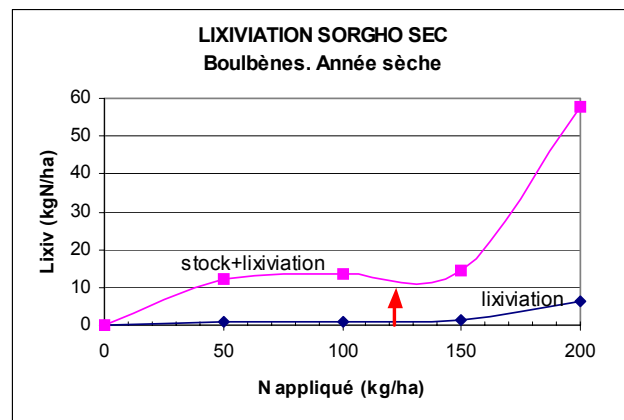
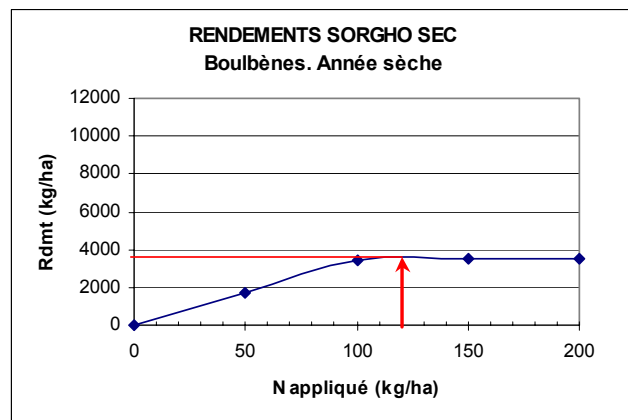
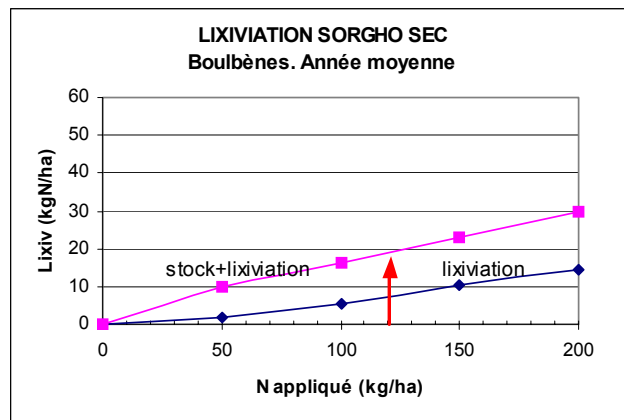
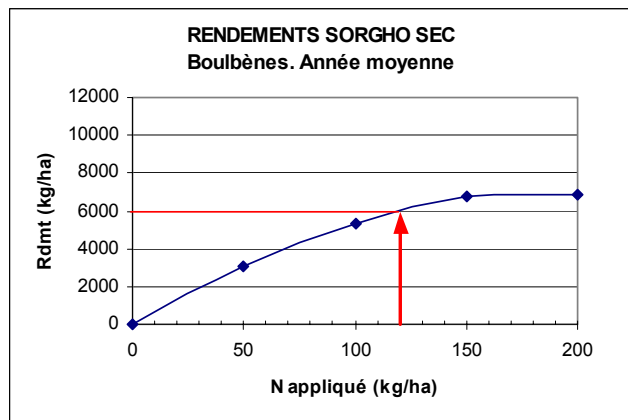
BLE TENDRE



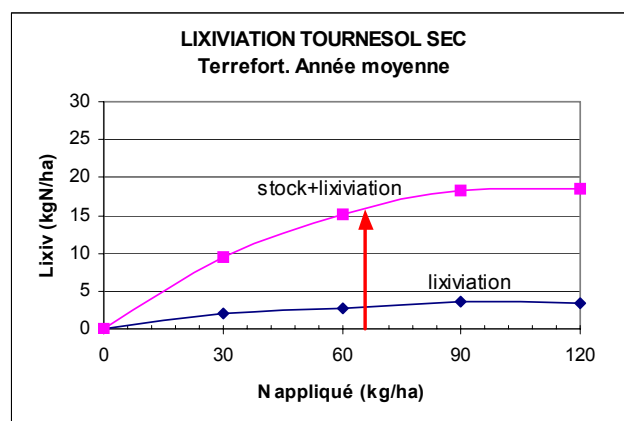
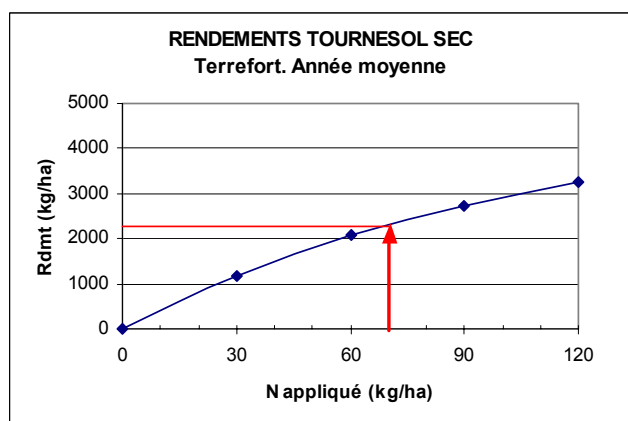
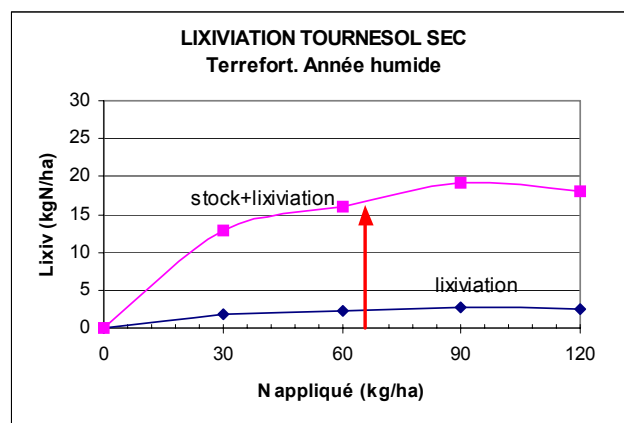
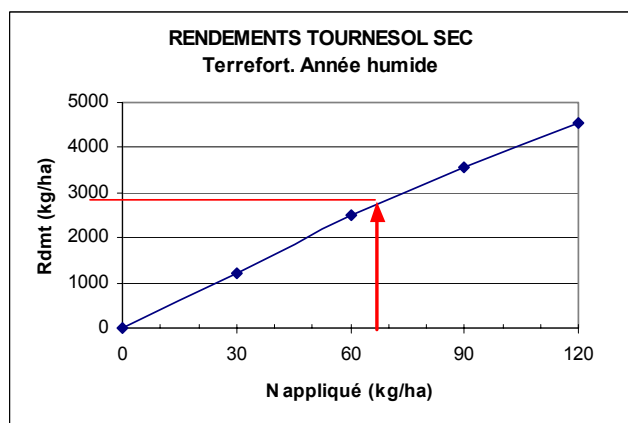
SORGHO SEC

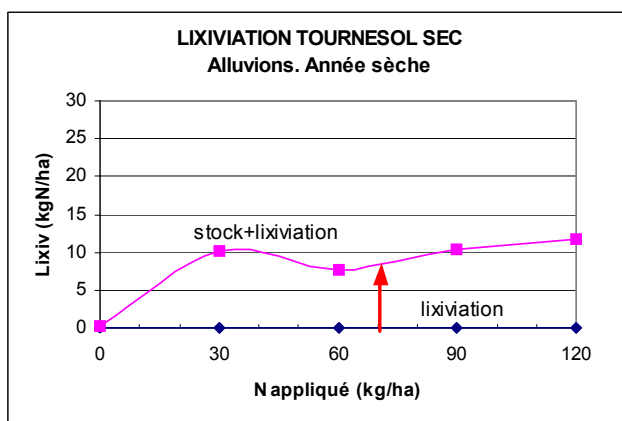
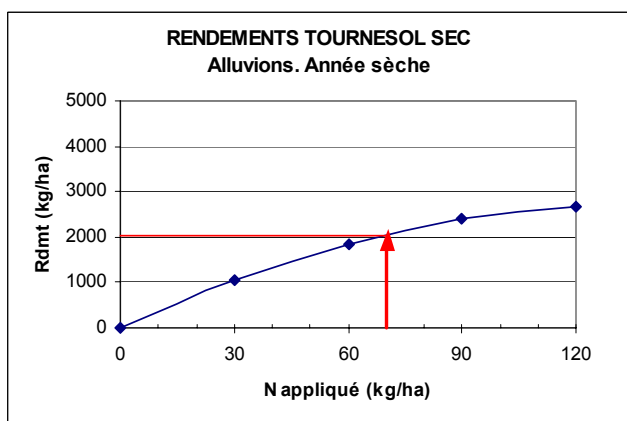
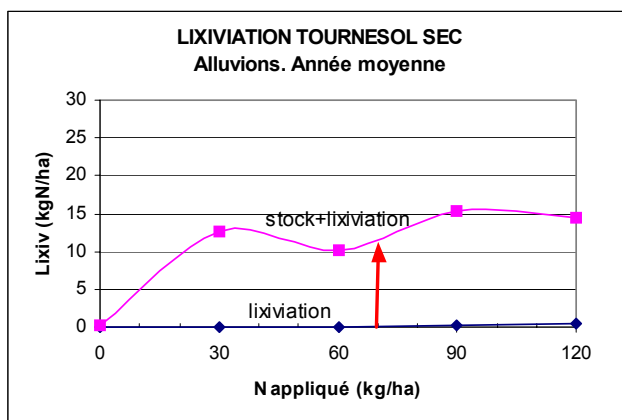
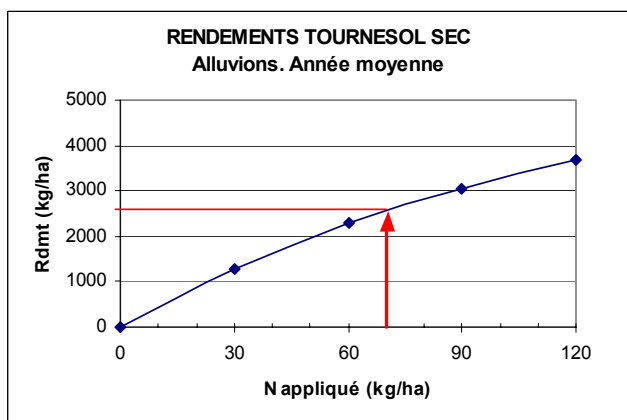
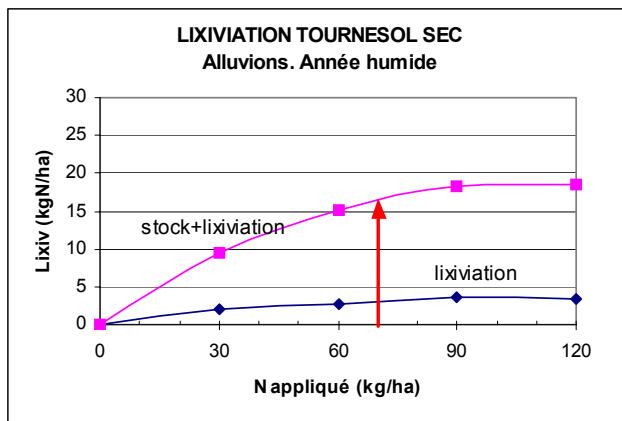
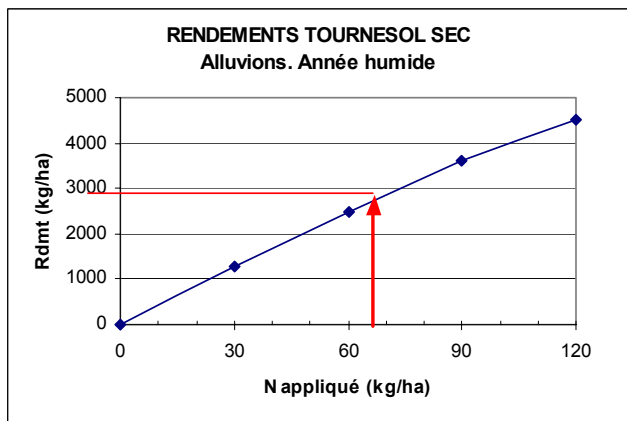
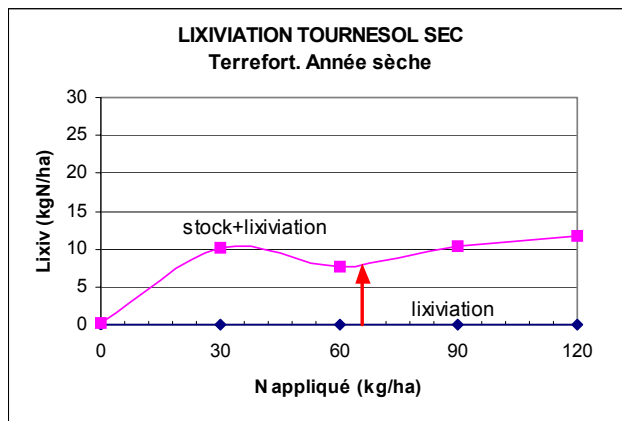
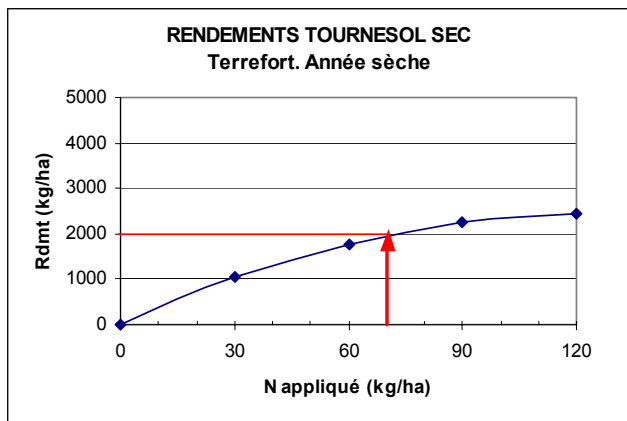


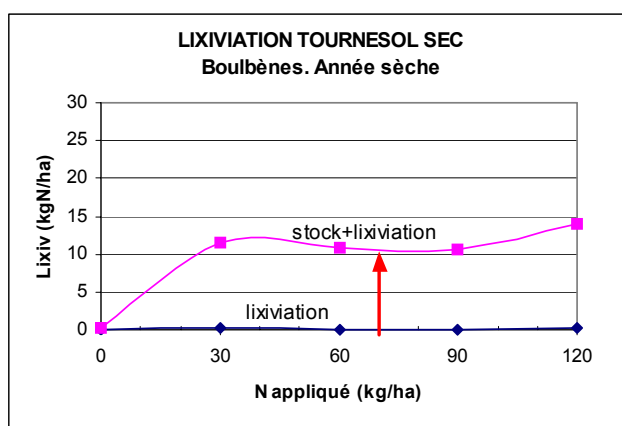
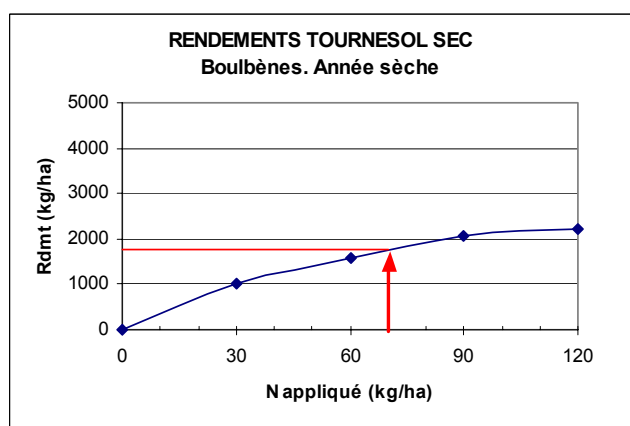
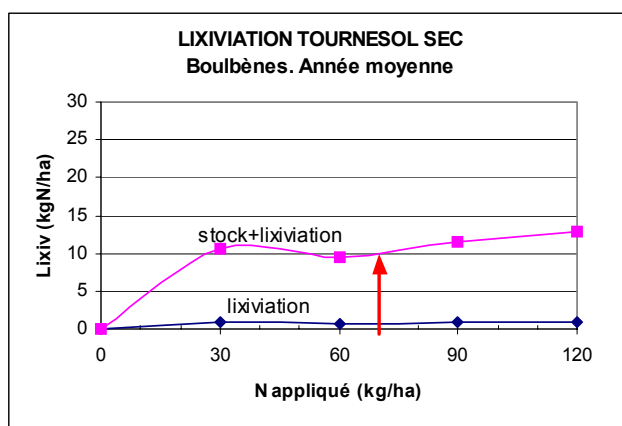
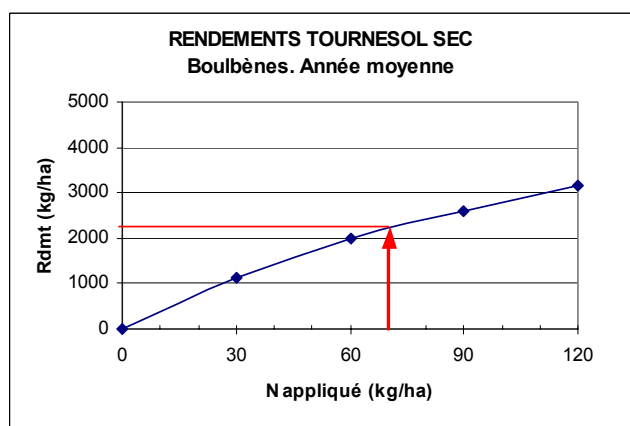
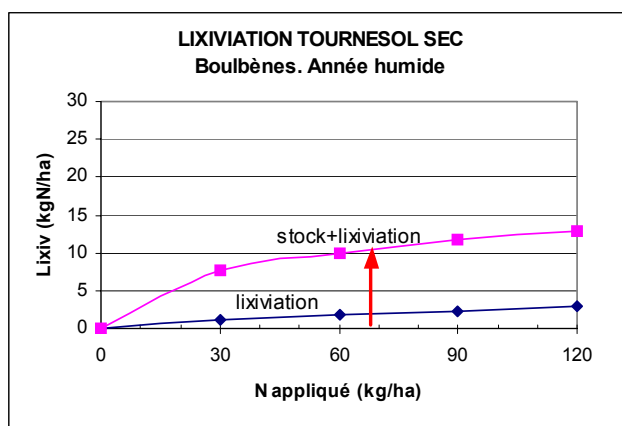
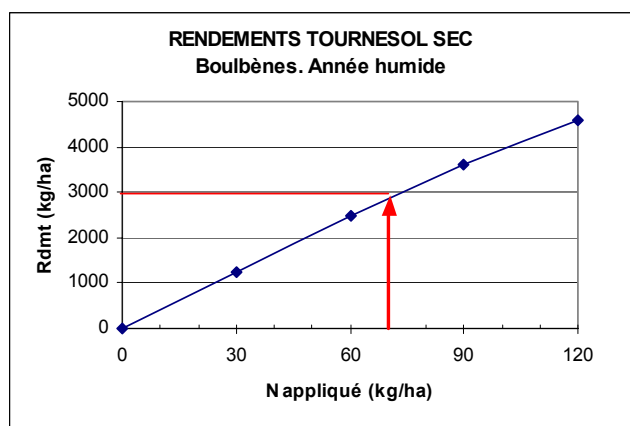




TOURNESOL SEC

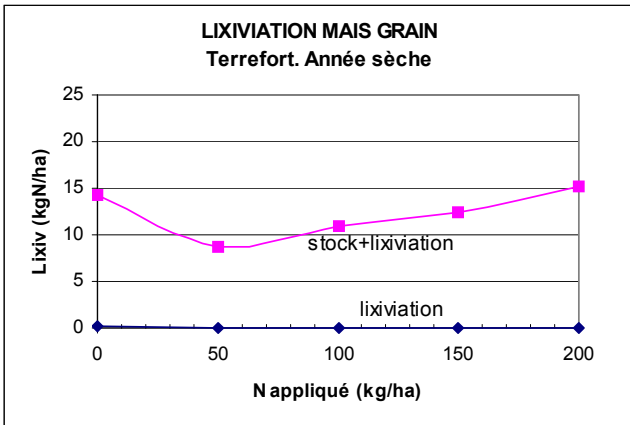
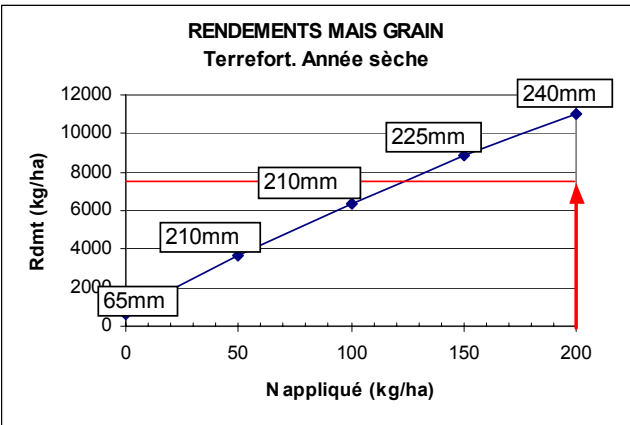
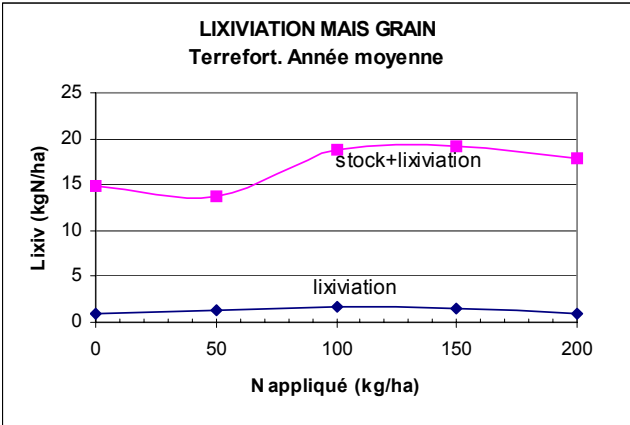
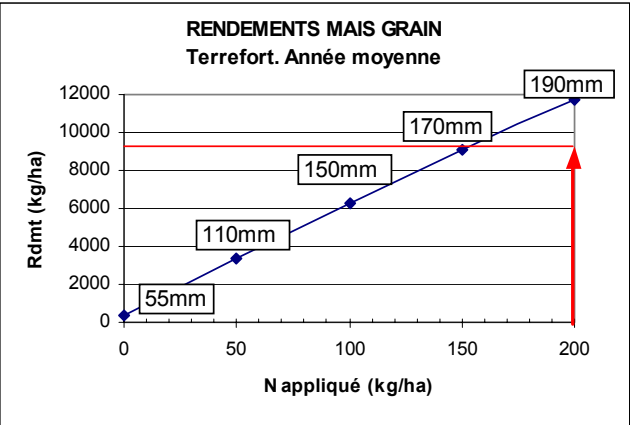
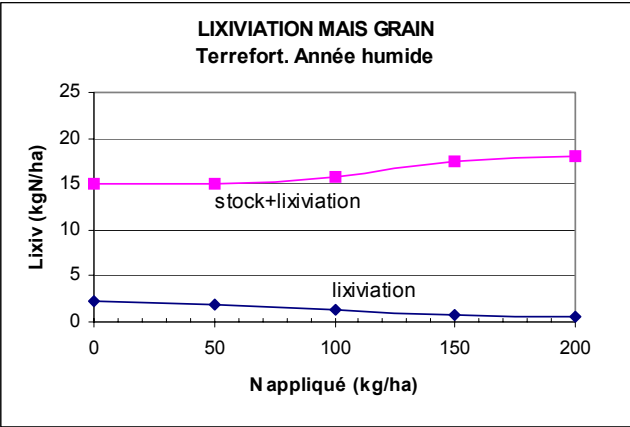
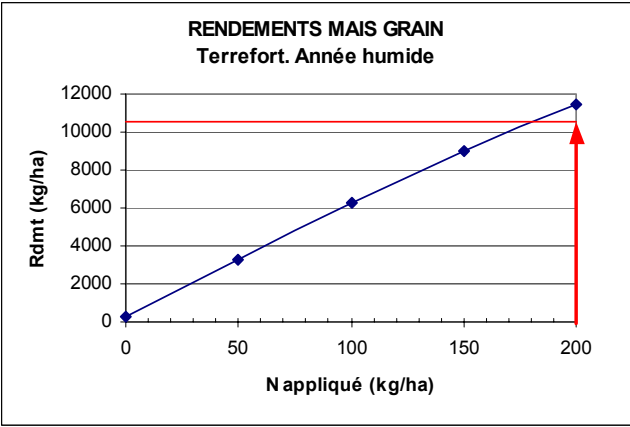


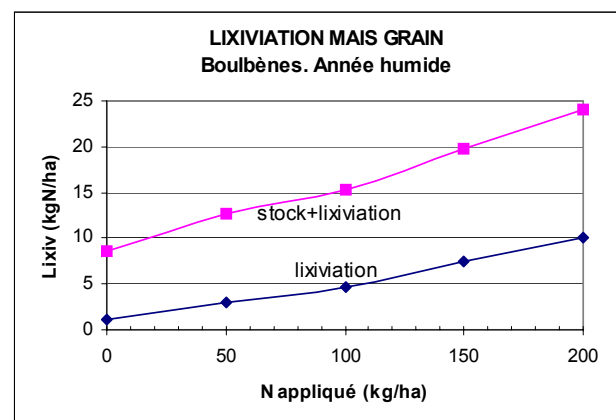
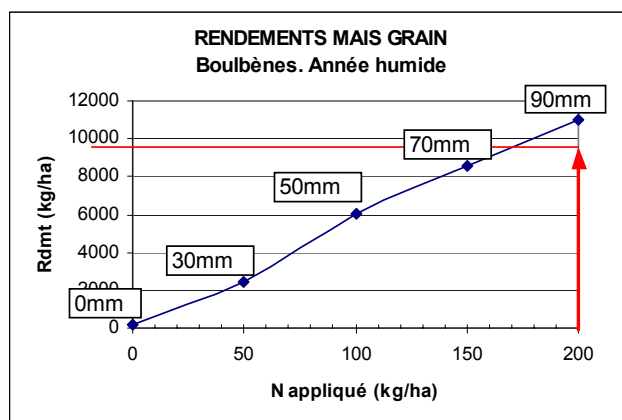
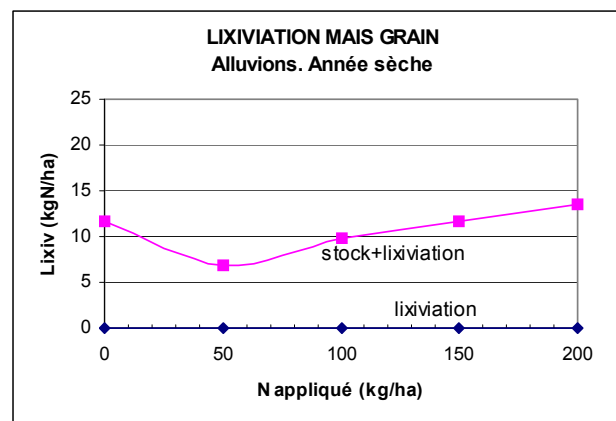
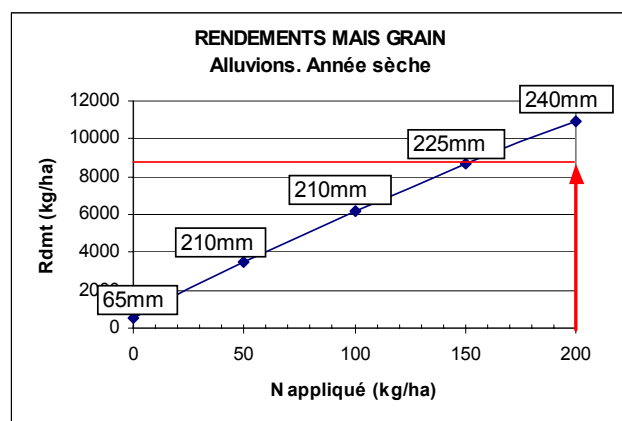
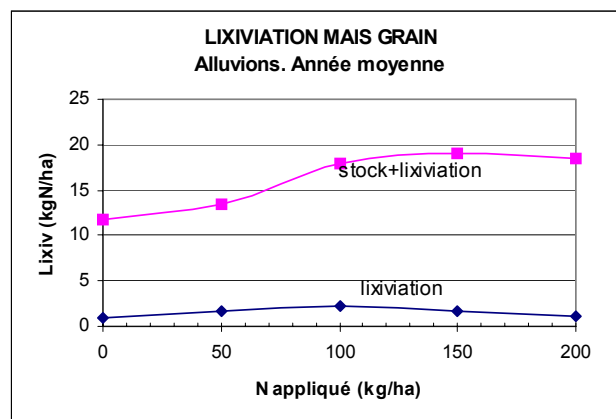
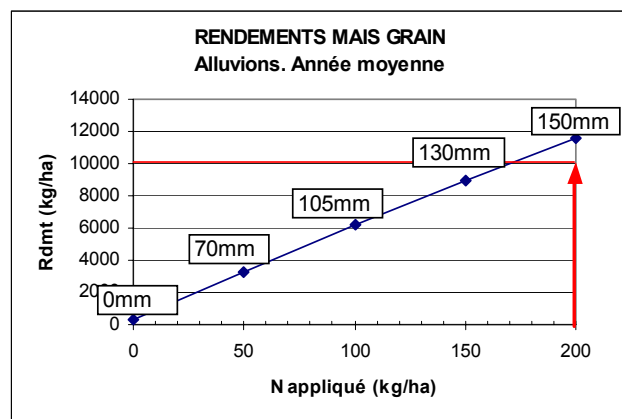
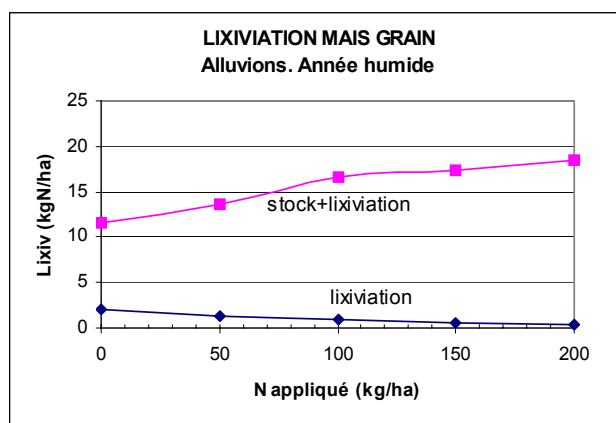
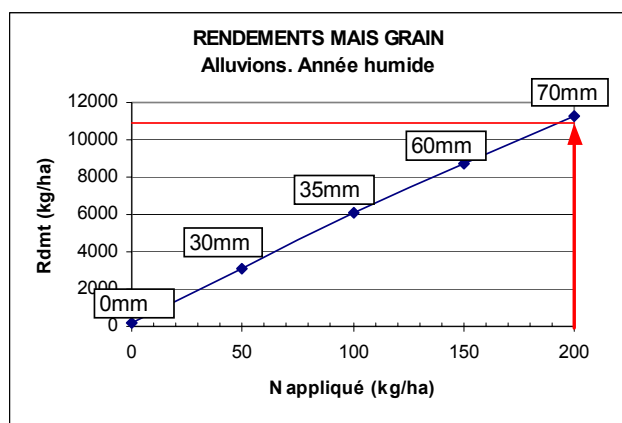


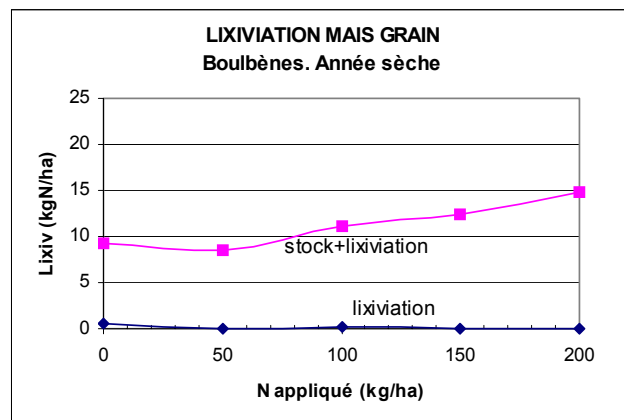
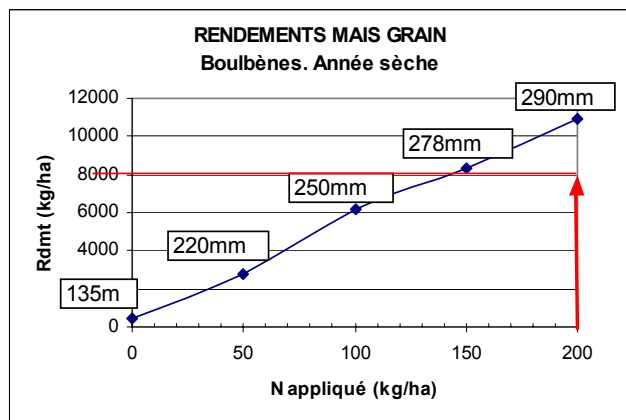
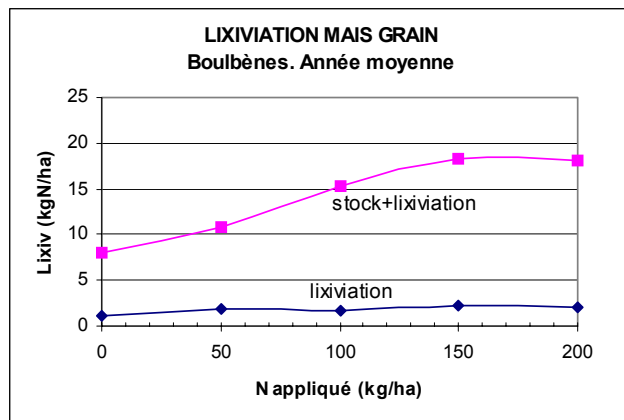
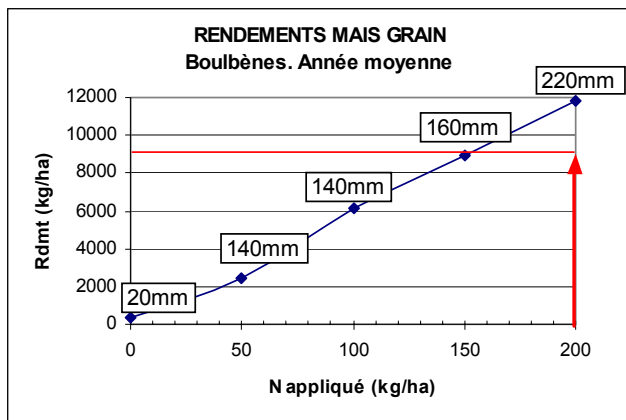


B. Cultures irriguées

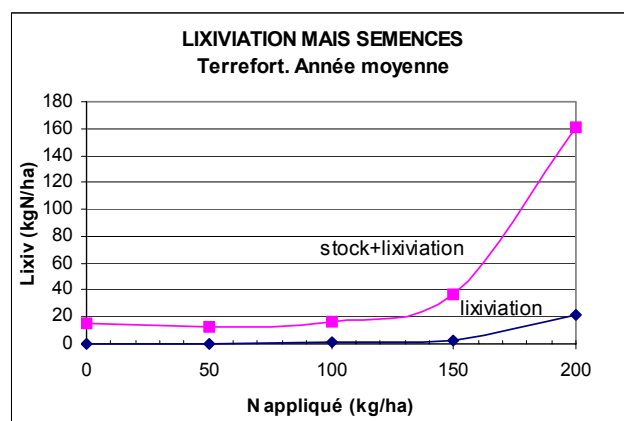
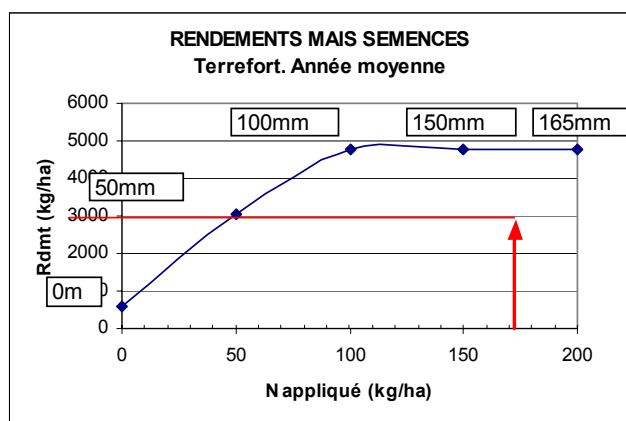
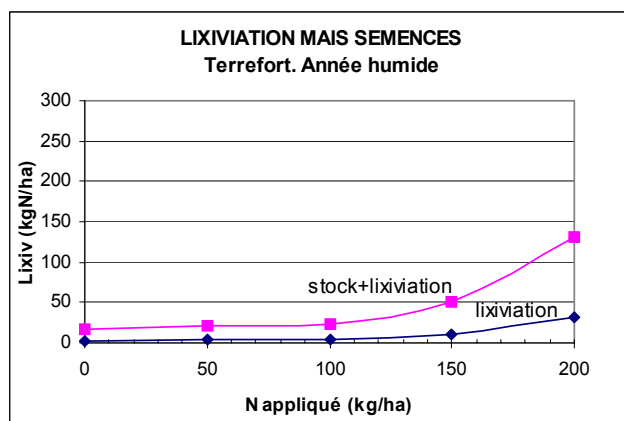
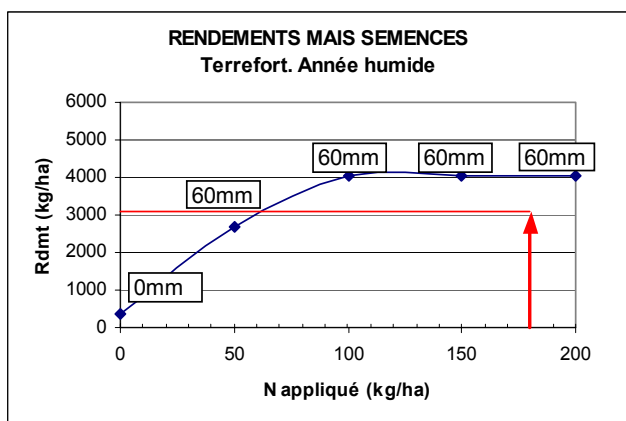
MAIS GRAIN

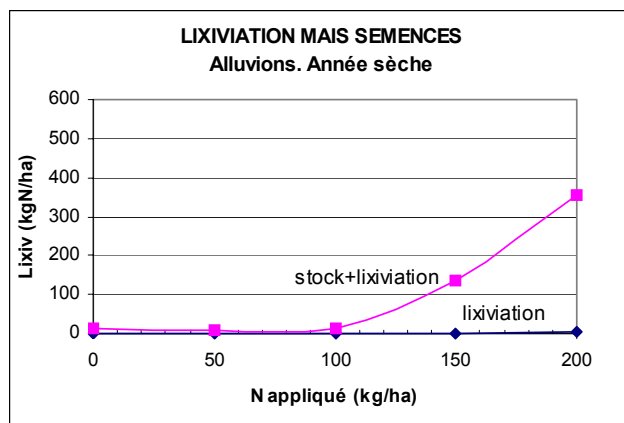
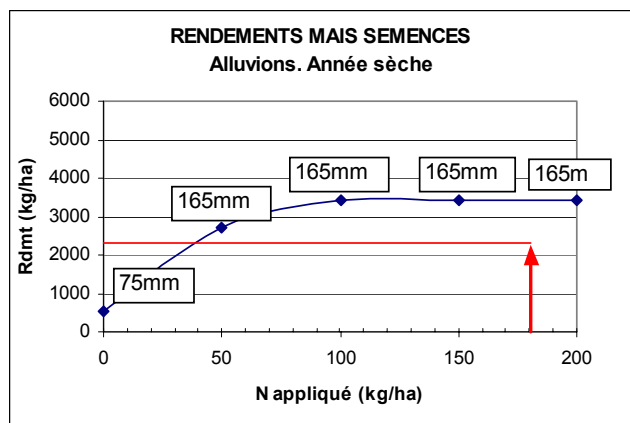
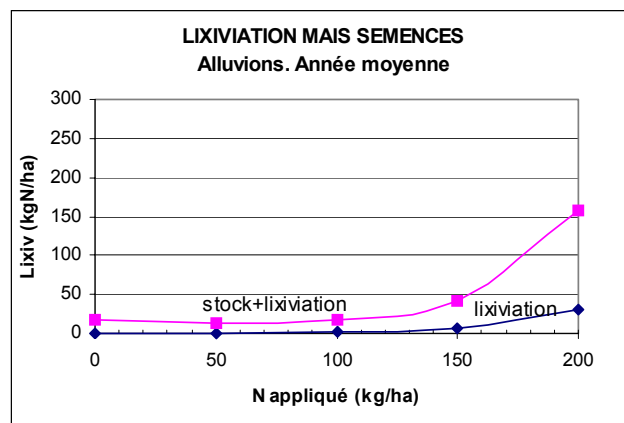
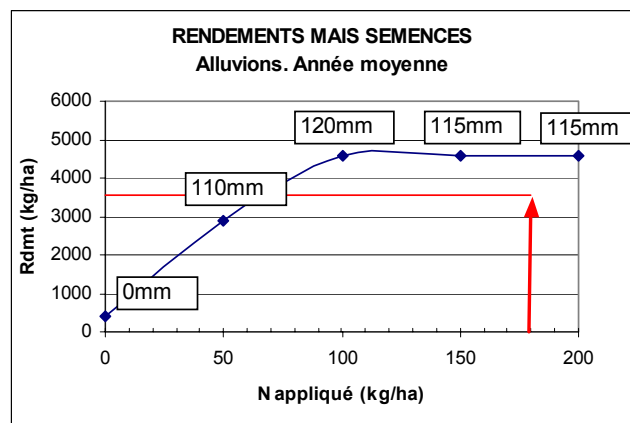
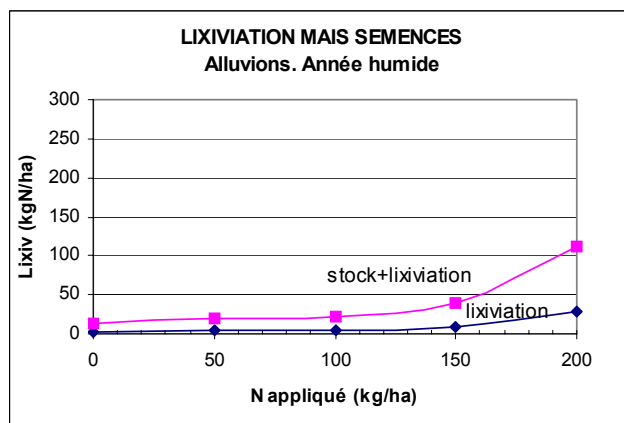
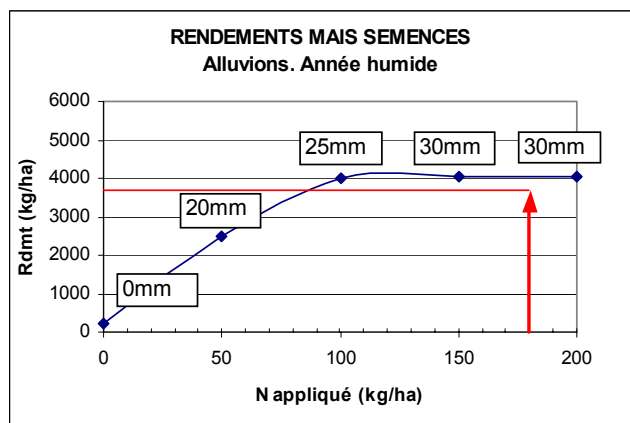
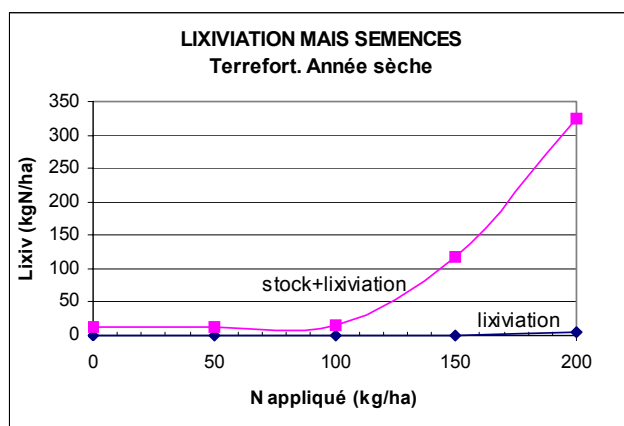
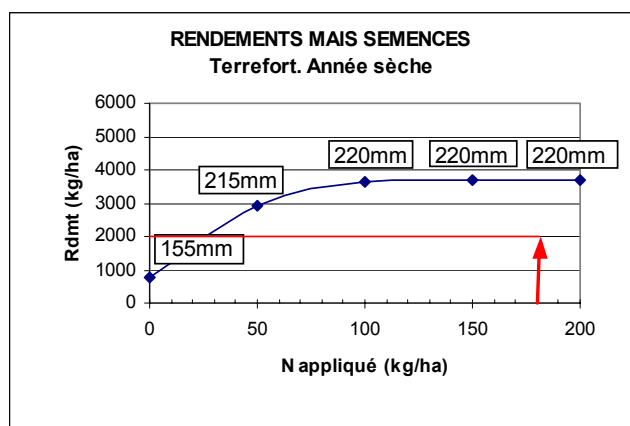


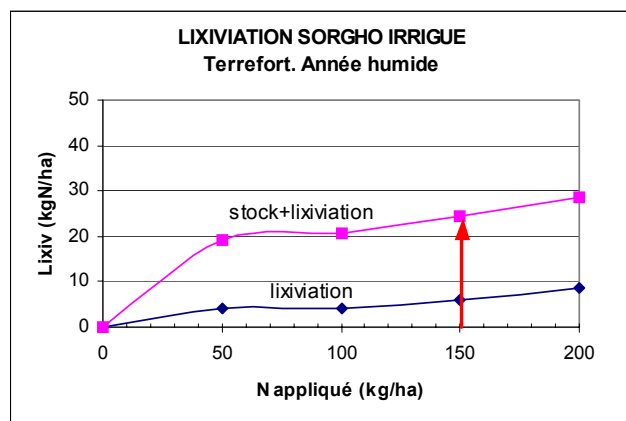
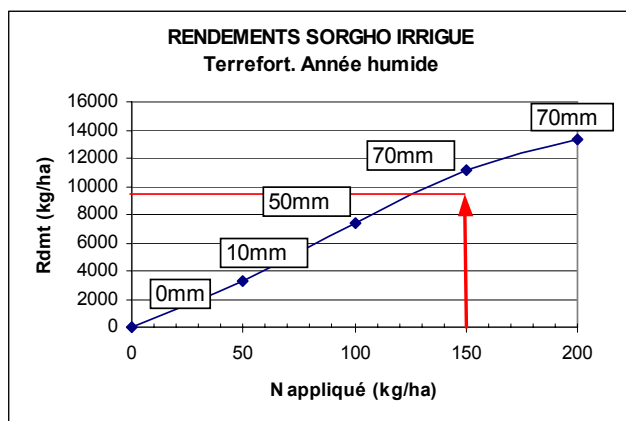
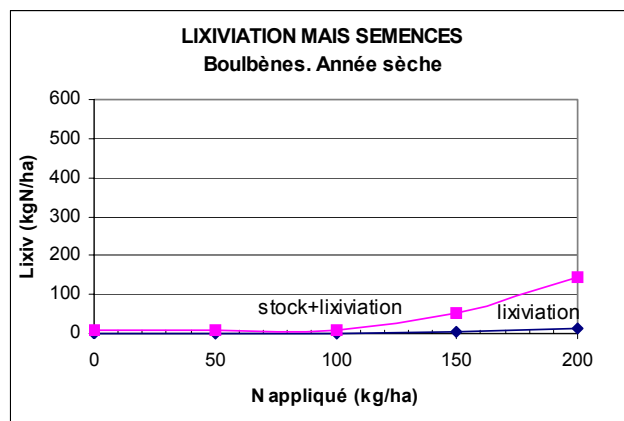
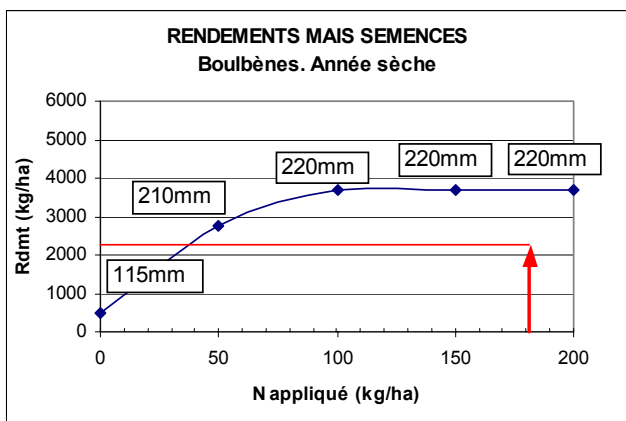
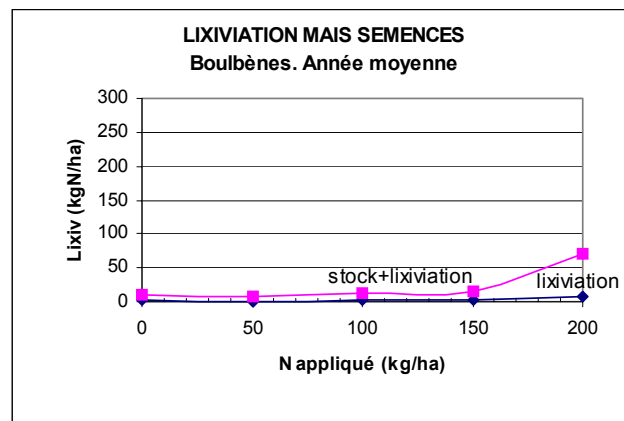
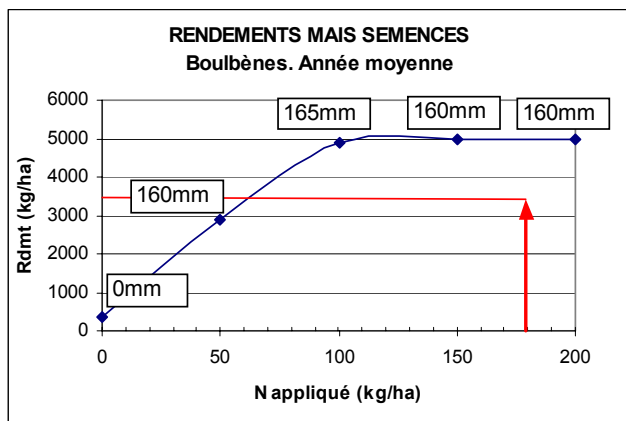
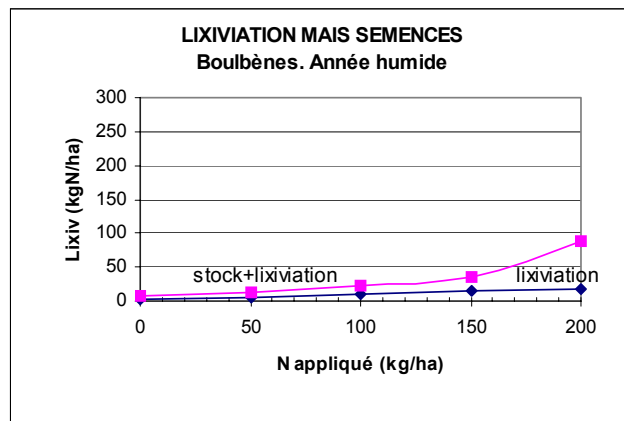
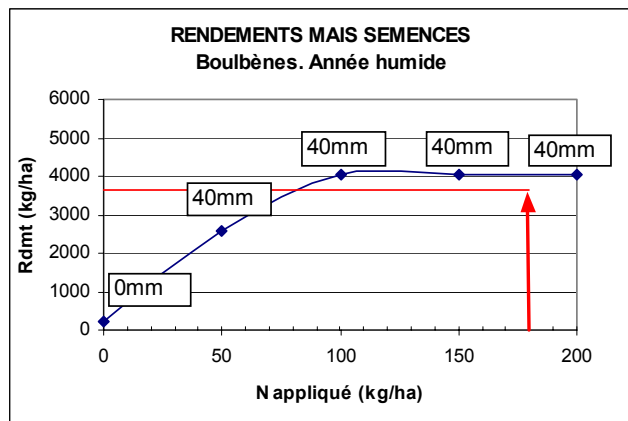




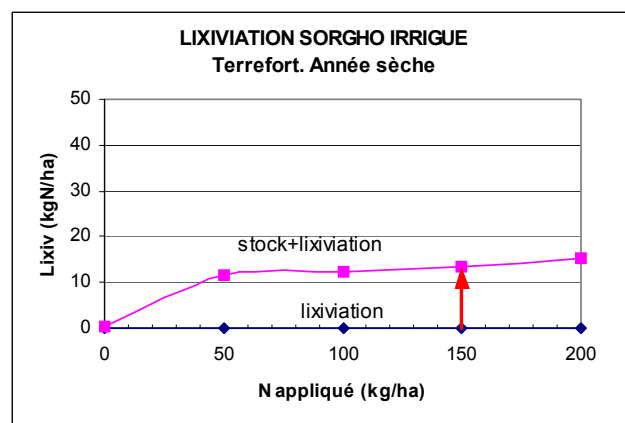
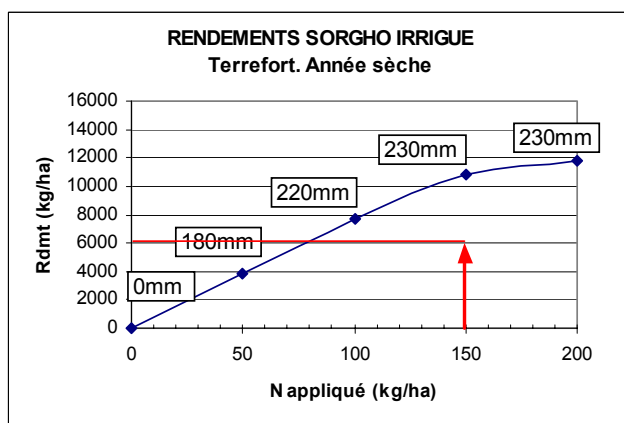
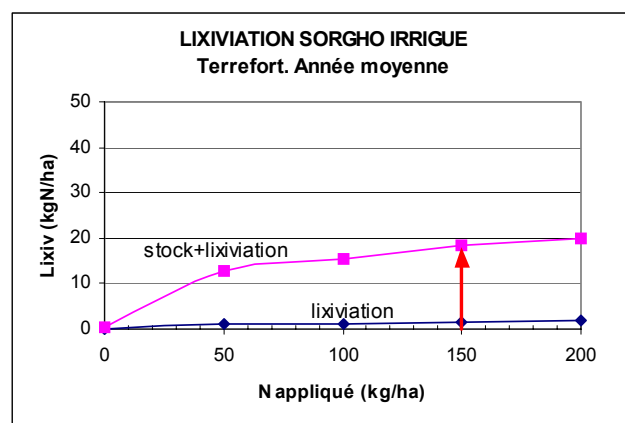
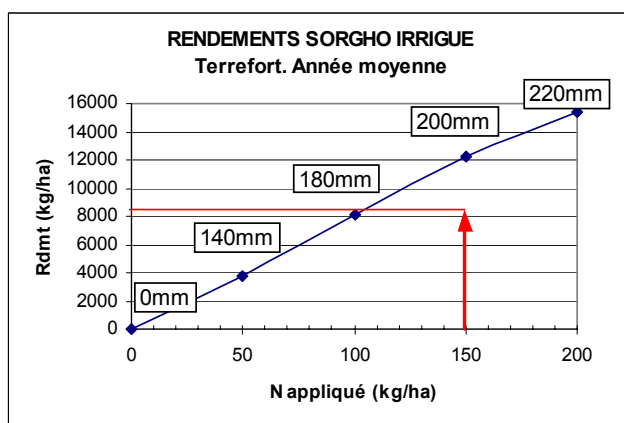
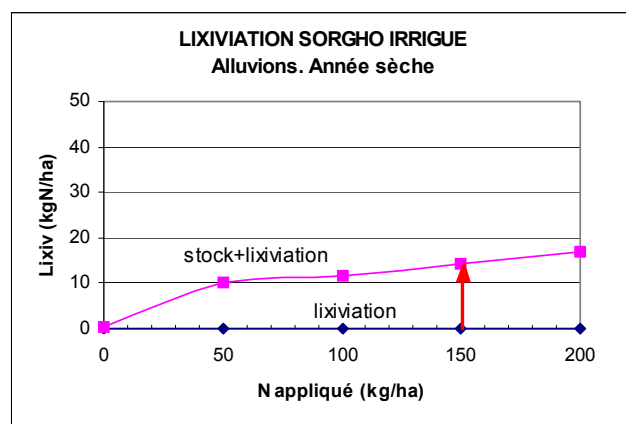
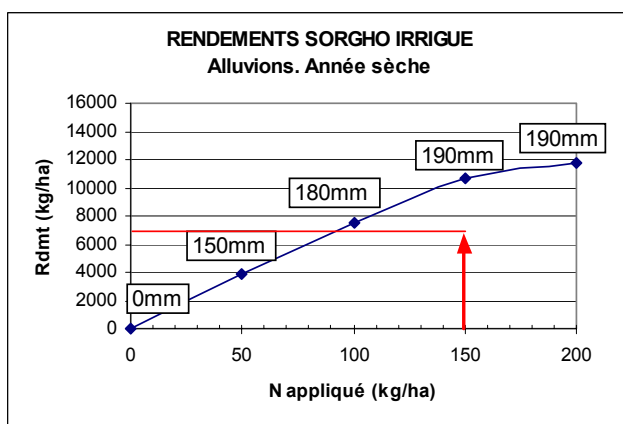
MAIS SEMENCES

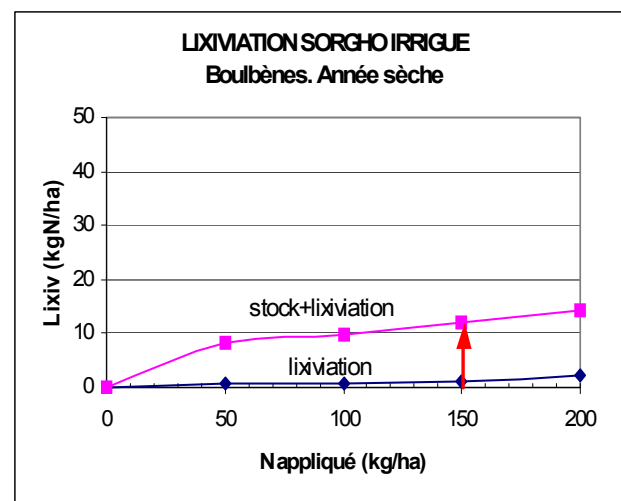
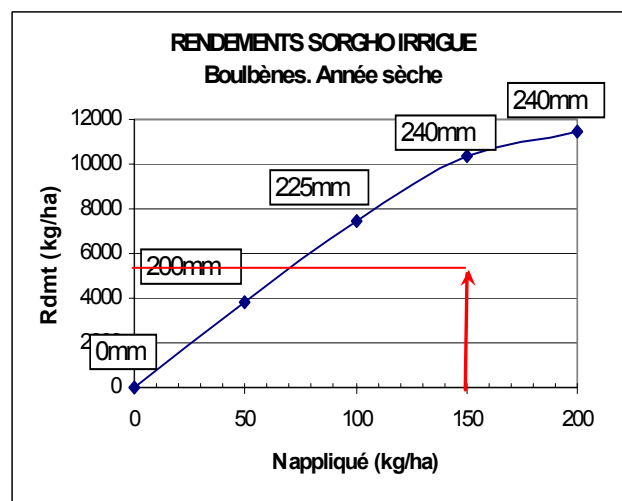
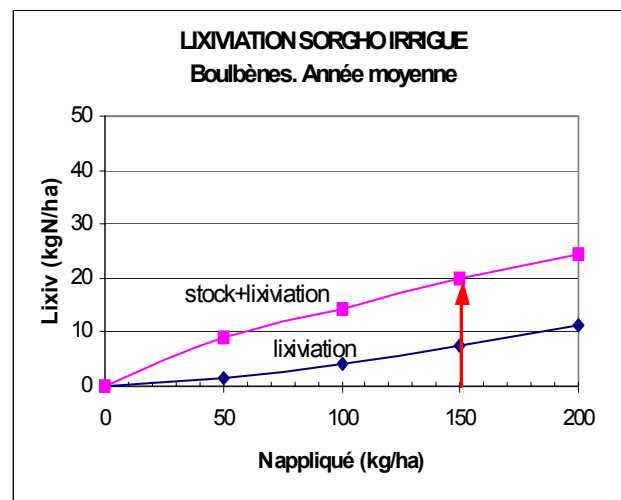
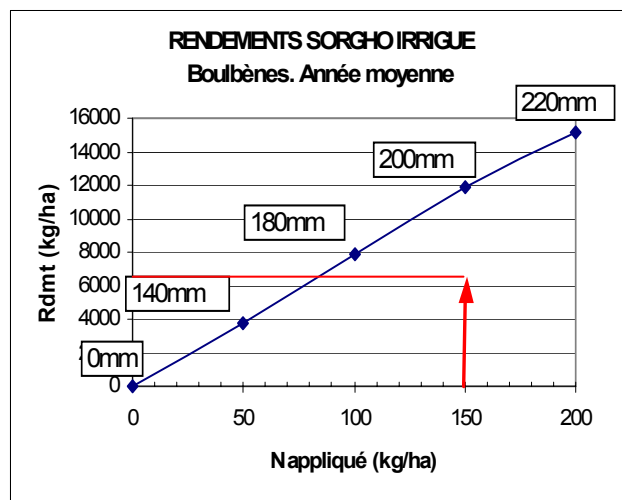
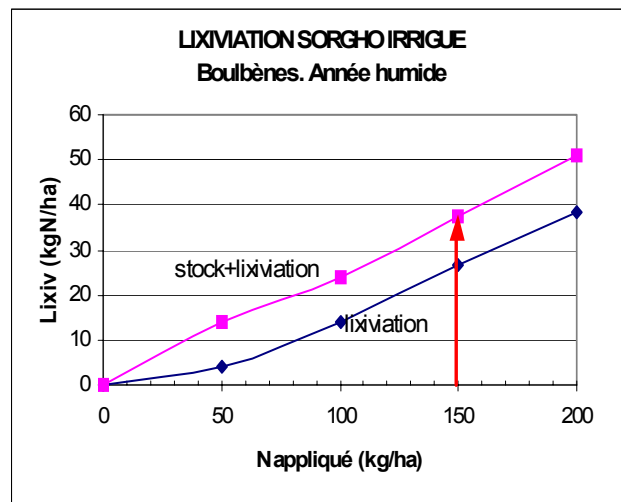
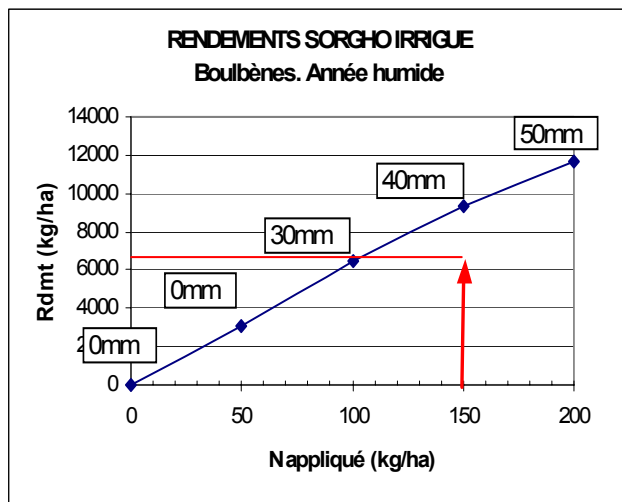




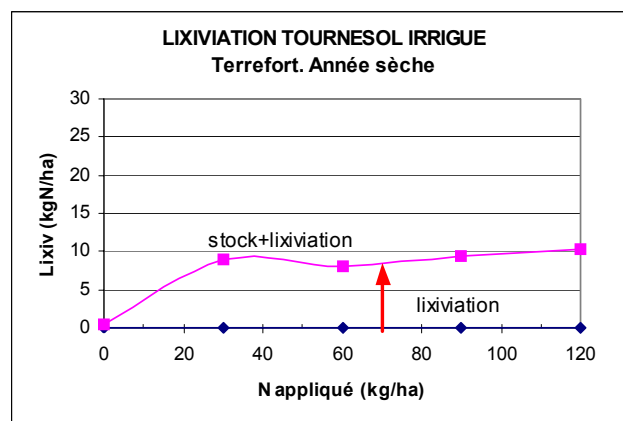
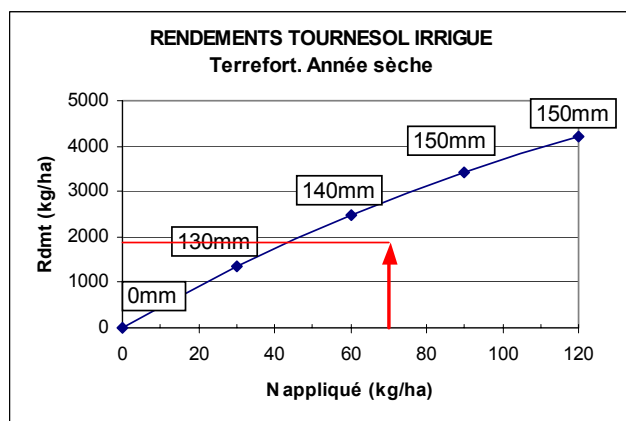
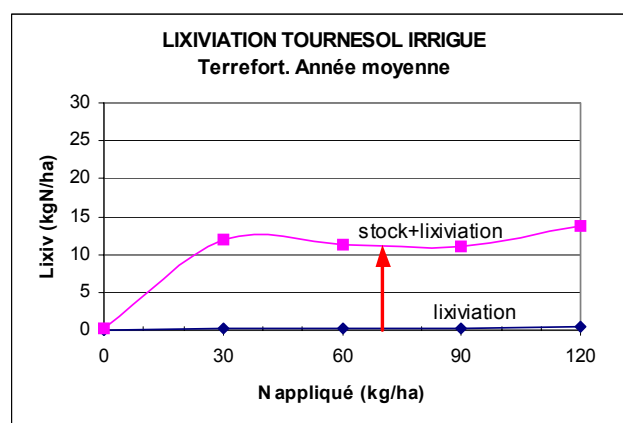
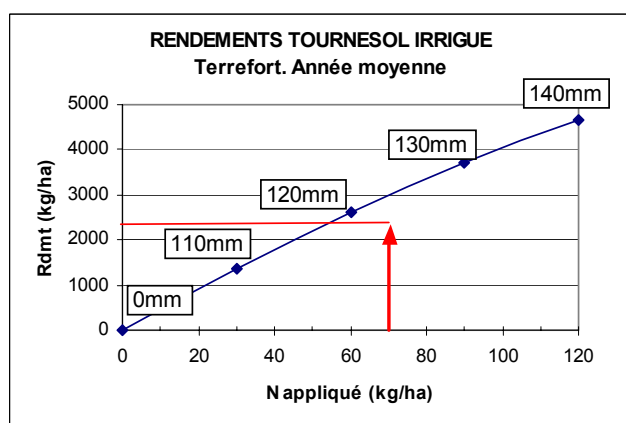
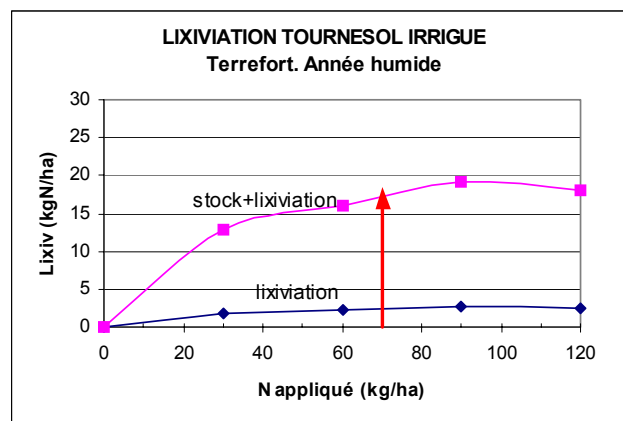
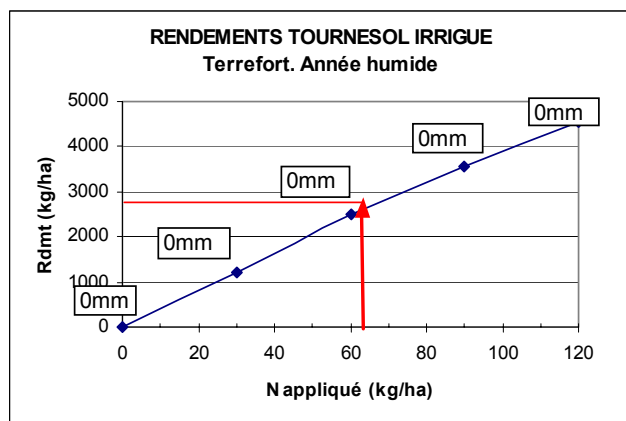


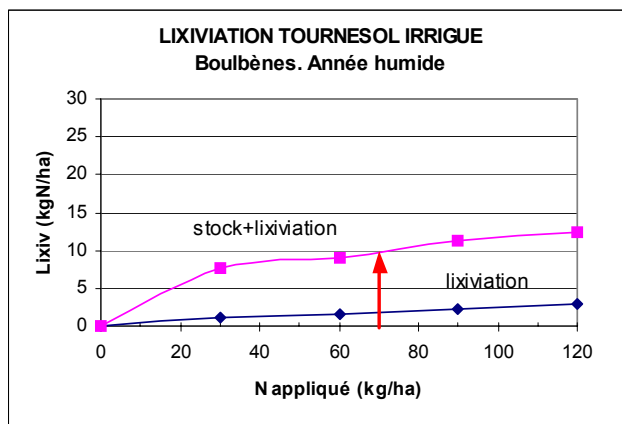
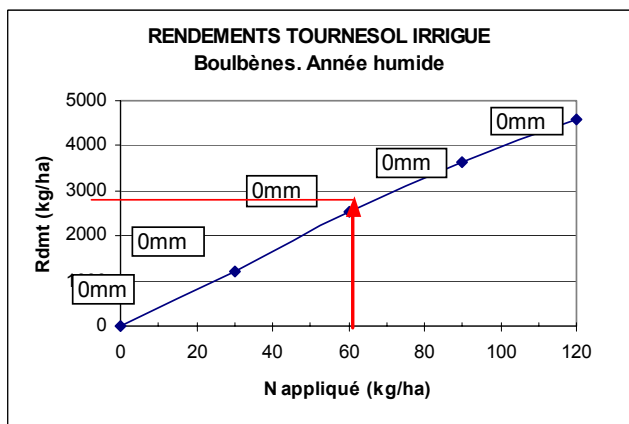
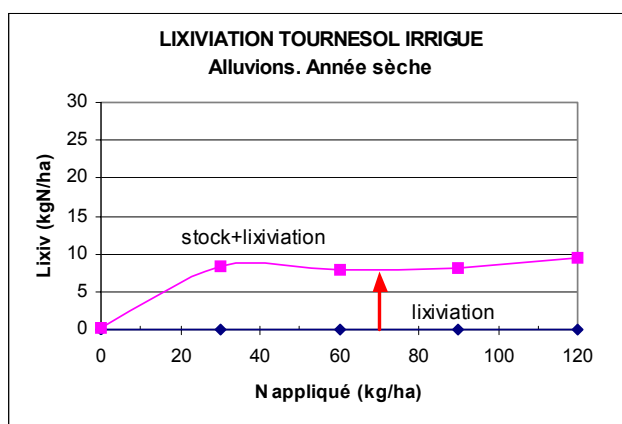
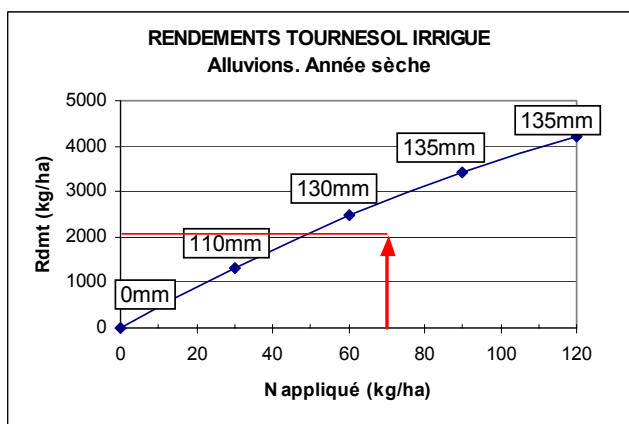
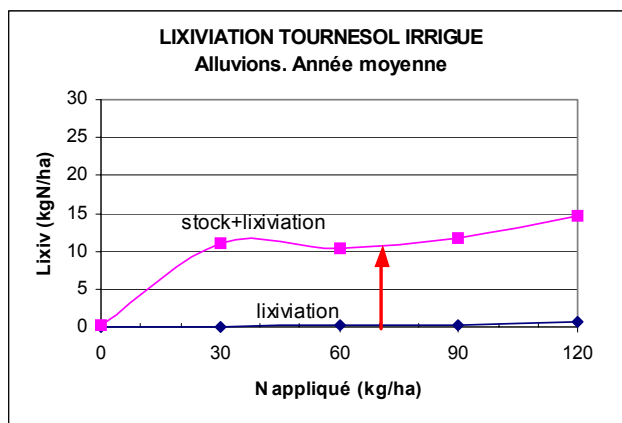
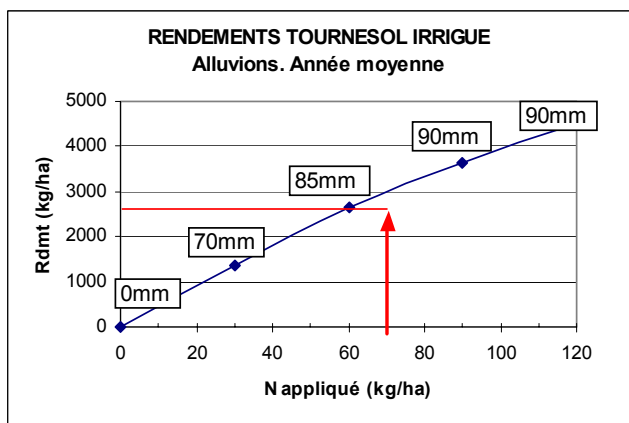
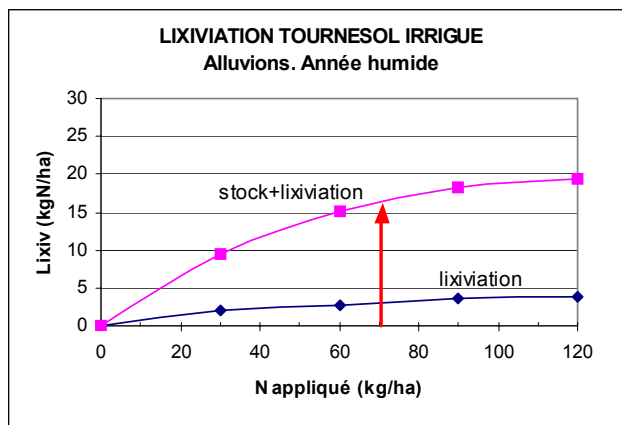
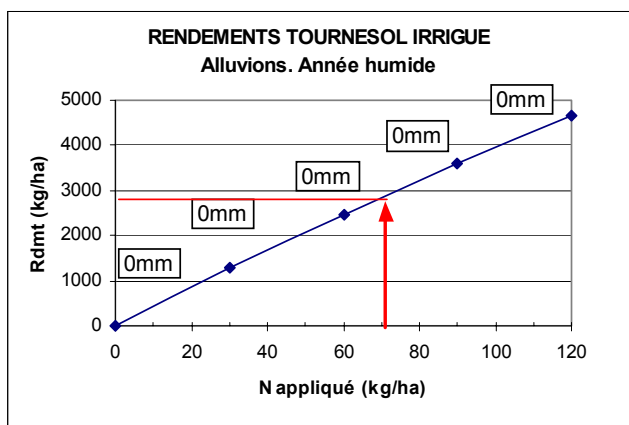
SORGHO IRRIGUE

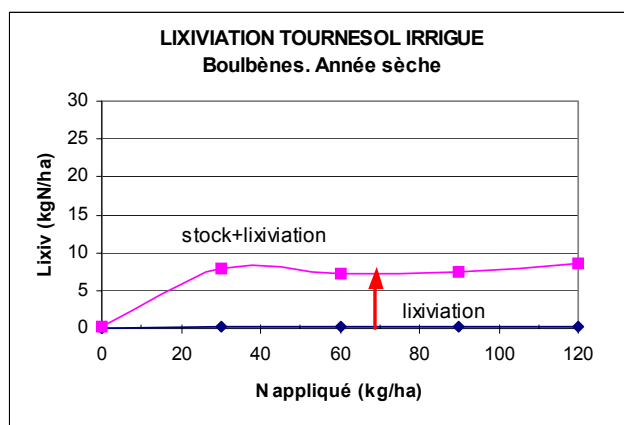
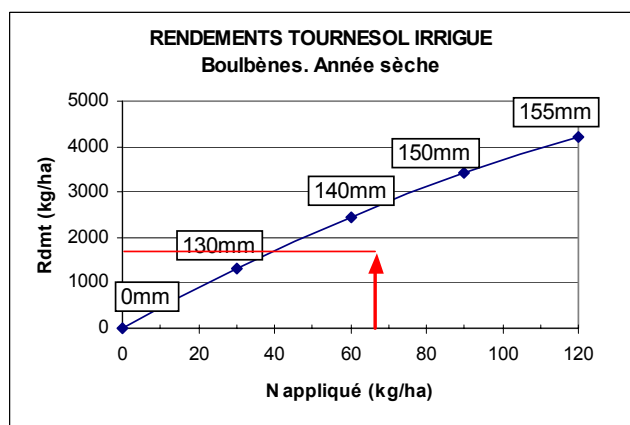
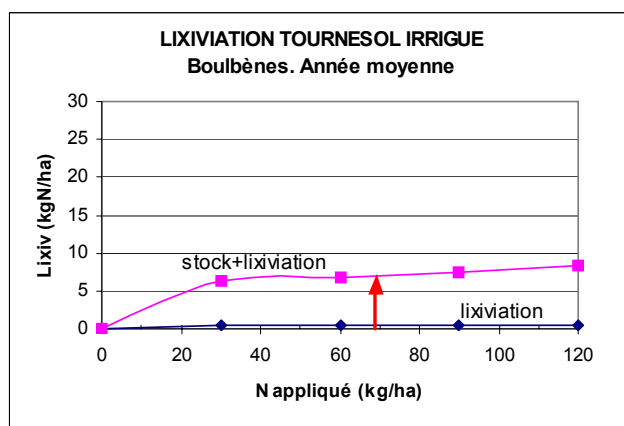
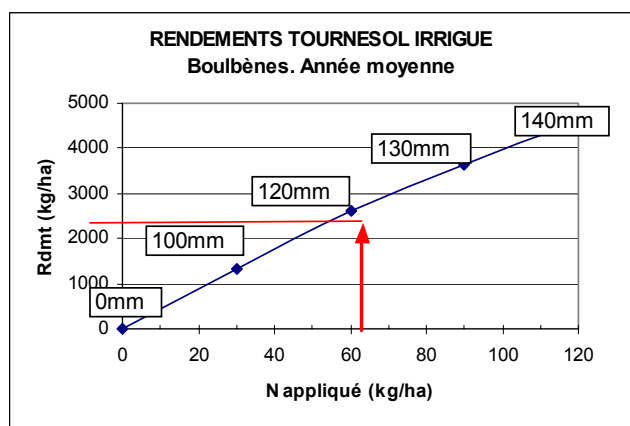




TOURNESOL IRRIGUE







Annexe 8

Scénario 1 : Comparaison entre doses d'irrigation et de fertilisation azotée appliquées dans la réalité et doses proposées par CROPSYST comme optimales, avec les rendements, la lixiviation et le stock azoté résultant de chacun des deux modèles

BLE DUR

Type sol	Type année	ITINERAIRES REELLES					ITINERAIRES OPTIMALES				
		Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)	Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)
Terrefort	AH	6634	0	230	24,72	13,96	6591	0	200	21,89	13,40
	AM	5343	0	230	8,70	15,27	5343	0	200	8,59	13,92
	AS	2993	0	230	16,32	223,02	2993	0	150	0,95	16,73
Alluvions	AH	6368	0	230	46,38	29,34	6368	0	230	46,38	29,34
	AM	6013	0	230	10,61	17,05	6013	0	200	10,59	14,46
	AS	3932	0	230	13,70	112,14	3947	0	150	2,00	17,92

BLE TENDRE

Type sol	Type année	ITINERAIRES REELLES					ITINERAIRES OPTIMALES				
		Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)	Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)
Terrefort	AH	6794	0	185	17,30	12,04	6794	0	185	17,30	12,04
	AM	6779	0	185	9,58	13,46	6779	0	185	9,58	13,46
	AS	3749	0	185	0,94	17,66	3723	0	150	0,80	14,37
Alluvions	AH	6054	0	185	35,28	15,72	6054	0	185	35,28	15,72
	AM	6796	0	185	11,10	14,54	6796	0	185	11,10	14,54
	AS	4963	0	185	1,69	17,81	4913	0	150	1,67	16,88

MAIS GRAIN

Type sol	Type année	ITINERAIRES REELLES					ITINERAIRES OPTIMALES				
		Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)	Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)
Terrefort	AH	10512	70	200	0,86	18,82	10512	102	181	0,61	17,24
	AM	9380	140	200	2,22	21,89	9380	172	155	1,37	17,69
	AS	7703	200	200	0,78	21,40	7703	251	127	0,00	11,70
Alluvions	AH	11019	90	200	1,87	20,89	11240	70	200	0,45	17,94
	AM	10161	200	200	3,88	21,57	11574	150	200	1,08	17,42
	AS	8873	275	200	4,42	23,41	8686	225	150	0,00	11,59
Boulbènes	AH	9615	120	200	36,16	11,83	11007	90	200	10,14	13,93
	AM	8925	250	200	13,96	14,54	8888	160	150	2,15	16,11
	AS	8043	400	200	4,16	16,42	8335	278	150	0,04	12,45

MAIS SEMENCE

Type sol	Type année	ITINERAIRES REELLES					ITINERAIRES OPTIMALES				
		Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)	Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)
Terrefort	AH	3197	70	180	26,96	72,32	4025	60	100	4,78	17,94
	AM	2946	140	180	54,18	122,32	2946	163	48	0,61	12,23
	AS	2074	200	180	74,83	177,81	2074	191	30	0,02	12,11
Alluvions	AH	3746	90	180	18,67	51,10	4014	25	100	5,16	17,60
	AM	3560	200	180	48,97	60,77	4596	120	100	1,99	15,79
	AS	2333	275	180	74,29	65,17	3424	165	100	0,01	13,81
Boulbènes	AH	3648	120	180	42,57	24,06	4024	40	100	10,55	12,21
	AM	3392	250	180	29,46	56,95	4871	165	100	1,51	10,51
	AS	2218	400	180	79,09	13,63	3676	220	100	0,43	9,92

SORGHO SEC

Type sol	Type année	ITINERAIRES REELLES					ITINERAIRES OPTIMALES				
		Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)	Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)
Terrefort	AH	7970	0	120	6,63	18,78	7970	0	120	6,63	18,78
	AM	7485	0	120	1,49	14,11	7485	0	120	1,49	14,11
	AS	4798	0	120	0,14	16,36	4798	0	120	0,14	16,36
Alluvions	AH	7993	0	120	9,36	19,43	7993	0	120	9,36	19,43
	AM	8054	0	120	3,46	15,12	8054	0	120	3,46	15,12
	AS	5703	0	120	0,26	18,39	5703	0	120	0,26	18,39
Boulbènes	AH	6716	0	120	21,03	11,74	6716	0	120	21,03	11,74
	AM	6086	0	120	7,50	10,66	6086	0	120	7,50	10,66
	AS	3941	0	120	1,08	12,52	3941	0	120	1,08	12,52

SORGHO IRRIGUE

Type sol	Type année	ITINERAIRES REELLES					ITINERAIRES OPTIMALES				
		Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)	Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)
Terrefort	AH	9794	35	150	9,25	19,47	9800	63	132	5,41	17,55
	AM	8287	70	150	3,45	18,11	8300	181	102	1,22	14,28
	AS	6026	100	150	1,56	18,37	6000	203	78	0,03	12,10
Alluvions	AH	9879	45	150	15,11	13,13	9900	31	139	8,75	18,59
	AM	9944	100	150	11,39	20,75	10000	149	124	2,60	15,59
	AS	7133	150	150	8,49	22,17	7200	177	95	0,00	11,63
Boulbènes	AH	6711	60	150	59,13	11,82	6800	31	105	15,39	10,11
	AM	6408	120	150	68,55	10,67	6400	165	82	3,18	9,24
	AS	5468	150	150	43,54	11,88	5500	212	73	0,64	8,18

TOURNESOL SEC

Type sol	Type année	ITINERAIRES REELLES					ITINERAIRES OPTIMALES				
		Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)	Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)
Terrefort	AH	2882	0	70	2,50	14,60	2882	0	70	2,50	14,60
	AM	2273	0	70	0,10	11,91	2273	0	70	0,10	11,91
	AS	1964	0	70	0,00	8,69	1964	0	70	0,00	8,69
Alluvions	AH	2856	0	70	3,32	13,59	2856	0	70	3,32	13,59
	AM	2541	0	70	0,13	12,70	2541	0	70	0,13	12,70
	AS	2047	0	70	0,00	7,87	2047	0	70	0,00	7,87
Boulbènes	AH	2888	0	70	1,89	8,63	2888	0	70	1,89	8,63
	AM	2205	0	70	0,83	10,09	2205	0	70	0,83	10,09
	AS	1767	0	70	0,09	10,94	1767	0	70	0,09	10,94

TOURNESOL IRRIGUE

Type sol	Type année	ITINERAIRES REELLES					ITINERAIRES OPTIMALES				
		Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)	Rdmt (kg/ha)	Irrig (mm)	Fertil (kgN/ha)	Lixiv (kgN/ha)	Stock (kgN/ha)
Terrefort	AH	2807	70	70	4,44	14,97	2800	0	68	2,37	14,45
	AM	2379	70	70	0,85	15,70	2400	118	55	0,20	11,12
	AS	1944	70	70	0,00	11,34	2000	136	47	0,00	8,38
Alluvions	AH	2783	70	70	5,25	13,13	2800	0	69	3,01	13,05
	AM	2583	70	70	1,24	16,07	2645	85	60	0,18	10,15
	AS	2032	70	70	0,00	9,30	2000	122	48	0,00	8,08
Boulbènes	AH	2794	70	70	4,53	8,53	2800	0	68	1,80	7,84
	AM	2305	70	70	1,67	10,25	2300	115	53	0,49	6,21
	AS	1751	70	70	0,38	11,30	1800	134	42	0,13	7,53

Annexe 9

Scénario 1 : Impact sur la consommation d'eau, d'azote, sur la lixiviation de nitrate, sur le reliquat azoté et sur la marge des techniques proposées pour l'ensemble du système

A. Consommation d'eau par zone (m³ et m³/ha irriguée) dans le scénario 1. Comparaison avec la situation actuelle (base)

	MODELE DE BASE			SCENARIO 1		
	CONSOMMATION D'EAU (m3)			CONSOMMATION D'EAU (m3)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
ZONE 1	829173	587504	308820	935564	685496	376078
ZONE 2	11617500	7359047	3741352	13488270	9270082	4551834
ZONE 3	13189860	7749610	4042396	10687660	6913788	3467372
ZONE 4	19007140	12392170	6484734	15548900	10079630	3655072
ZONE 5	6883137	4599414	2506037	7544393	5217509	2843938
TOTAL	51526830	32687740	17083340	48204820	32166510	14894290

	MODELE DE BASE			SCENARIO 1		
	CONSOM. D'EAU (m3/ha irriguée)			CONSOM. D'EAU (m3/ha irriguée)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
ZONE 1	2182,03	1546,06	812,68	2462,01	1803,94	989,68
ZONE 2	2010,64	1273,63	647,52	2334,42	1604,38	787,79
ZONE 3	3304,07	1941,29	1012,62	2677,27	1731,91	868,58
ZONE 4	4063,96	2649,60	1386,52	3324,55	2155,15	781,50
ZONE 5	2282,21	1525,00	830,91	2501,46	1729,94	942,95
TOTAL	2887,79	1831,96	957,43	2701,61	1802,75	834,74

B. Consommation d'azote par zone (kg N et kg N/ha) dans le scénario 1. Comparaison avec la situation actuelle (base)

	DIMINUT. EAU (m3)			DIMINUT. EAU (m3/ha irriguée)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
ZONE 1	-106391	-97992	-67258	-279,98	-257,87	-176,99
ZONE 2	-1870770	-1911035	-810482	-323,77	-330,74	-140,27
ZONE 3	2502200	835822	575024	626,80	209,37	144,04
ZONE 4	3458240	2312540	2829662	739,41	494,45	605,02
ZONE 5	-661256	-618095	-337901	-219,25	-204,94	-112,04
TOTAL	3322010	521230	2189050	186,18	29,21	122,68

	MODELE DE BASE			SCENARIO 1		
	CONSOMMATION D'AZOTE (kg)			CONSOMMATION D'AZOTE (kg)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
ZONE 1	483651	483651	483651	435552	470190	477035
ZONE 2	1686850	1686850	1686850	1308437	1481922	1590084
ZONE 3	854785	854785	854785	698007	804711	814348
ZONE 4	957949	957949	957949	797213	799748	914893
ZONE 5	1057660	1057660	1057660	807716	934741	986158
TOTAL	5040895	5040895	5040895	4046924	4491312	4782518

	MODELE DE BASE			SCENARIO 1		
	AZOTE (kg/ha)			AZOTE (kg/ha)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
ZONE 1	32,02	32,02	32,02	28,84	31,13	31,59
ZONE 2	87,92	87,92	87,92	68,19	77,24	82,87
ZONE 3	94,14	94,14	94,14	76,87	88,62	89,69
ZONE 4	103,09	103,09	103,09	85,80	86,07	98,46
ZONE 5	99,78	99,78	99,78	76,20	88,18	93,03
TOTAL	79,68	79,68	79,68	63,97	71,00	75,60

	DIMINUT. AZOTE (kg)			DIMINUT. AZOTE (kg/ha)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
ZONE 1	48099	13461	6616	3,18	0,89	0,44
ZONE 2	378413	204928	96766	19,72	10,68	5,04
ZONE 3	156778	50074	40437	17,27	5,51	4,45
ZONE 4	160736	158201	43056	17,30	17,03	4,63
ZONE 5	249944	122919	71502	23,58	11,60	6,75
TOTAL	993971	549583	258377	15,71	8,69	4,08

C. Lixiviation des nitrates (kgN et kgN/ha) : résultats par zone pour le scénario 1 et comparaison avec la situation actuelle (base)

	MODELE DE BASE			SCENARIO 1		
	LIXIVIATION (kgN)			LIXIVIATION (kgN)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
ZONE 1	2154	8435	15245	621	7751	14638
ZONE 2	42196	57982	73829	2042	28203	58283
ZONE 3	42261	40237	51670	1629	14125	42486
ZONE 4	56331	74730	194740	3339	23375	114580
ZONE 5	35892	37697	54753	1780	21243	45389
TOTAL	178832	219080	390238	9412	94697	275375

	MODELE DE BASE			SCENARIO 1		
	LIXIVIATION (kgN/ha)			LIXIVIATION (kgN/ha)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
ZONE 1	0,14	0,56	1,01	0,04	0,51	0,97
ZONE 2	2,20	3,02	3,85	0,11	1,47	3,04
ZONE 3	4,65	4,43	5,69	0,18	1,56	4,68
ZONE 4	6,06	8,04	20,96	0,36	2,52	12,33
ZONE 5	3,39	3,56	5,17	0,17	2,00	4,28
TOTAL	2,83	3,46	6,17	0,15	1,50	4,35

	REDUCT. LIXIVIATION (kgN)			REDUCT. LIXIVIATION (kgN/ha)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
ZONE 1	1533	684	607	0,10	0,05	0,04
ZONE 2	40154	29779	15546	2,09	1,55	0,81
ZONE 3	40632	26112	9184	4,47	2,88	1,01
ZONE 4	52992	51355	80160	5,70	5,53	8,63
ZONE 5	34112	16454	9364	3,22	1,55	0,88
TOTAL	169420	124383	114863	2,68	1,97	1,82

D. Stock azoté (kgN et kgN/ha) : résultats par zone pour le scénario 1 et comparaison avec la situation actuelle (base)

	MODELE DE BASE			SCENARIO 1		
	STOCK AZOTE (kgN)			STOCK AZOTE (kgN)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
ZONE 1	32806	20798	19209	17117	18779	18541
ZONE 2	223592	178671	152013	98742	113258	121808
ZONE 3	97922	87723	83330	49691	60673	66115
ZONE 4	64766	71618	48573	53419	53616	47518
ZONE 5	286157	109072	90857	62862	71067	73911
TOTAL	705242	467882	393982	281831	317393	327892

	MODELE DE BASE			SCENARIO 1		
	STOCK AZOTE (kgN/ha)			STOCK AZOTE (kgN/ha)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
ZONE 1	2,17	1,38	1,27	1,13	1,24	1,23
ZONE 2	11,65	9,31	7,92	5,15	5,90	6,35
ZONE 3	10,78	9,66	9,18	5,47	6,68	7,28
ZONE 4	6,97	7,71	5,23	5,75	5,77	5,11
ZONE 5	27,00	10,29	8,57	5,93	6,70	6,97
TOTAL	11,15	7,40	6,23	4,45	5,02	5,18

	REDUCT. STOCK AZOTE (kgN)			REDUCT. STOCK AZOTE (kgN/ha)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
ZONE 1	15689	2019	668	1,04	0,13	0,04
ZONE 2	124850	65413	30205	6,51	3,41	1,57
ZONE 3	48231	27050	17215	5,31	2,98	1,90
ZONE 4	11347	18002	1055	1,22	1,94	0,11
ZONE 5	223295	38005	16946	21,07	3,59	1,60
TOTAL	423411	150489	66090	6,69	2,38	1,04

E. Marge brute (F et F/ha) : résultats par zone pour le scénario 1 et comparaison avec la situation actuelle (base)

	MODELE DE BASE MARGE (F)			SCENARIO 1 MARGE (F)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
ZONE 1	26500240	28832590	29585730	26601110	28831300	29605620
ZONE 2	84715920	115453800	135613900	85044830	115224800	138313400
ZONE 3	63363120	79236820	92030800	68306050	84203230	93468960
ZONE 4	26266050	37600820	42233540	33642690	43953550	47105090
ZONE 5	35924510	47851660	55109000	36472770	47984990	56773380
TOTAL	236769800	308975600	354573000	250067500	320197800	365266500

	MODELE DE BASE MARGE (F/ha)			SCENARIO 1 MARGE (F/ha)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
ZONE 1	1754,63	1909,06	1958,93	1761,31	1908,98	1960,25
ZONE 2	4415,28	6017,29	7068,01	4432,42	6005,36	7208,70
ZONE 3	6978,32	8726,52	10135,55	7522,69	9273,48	10293,94
ZONE 4	2826,74	4046,58	4545,15	3620,61	4730,26	5069,42
ZONE 5	3389,10	4514,31	5198,96	3440,83	4526,89	5355,98
TOTAL	3742,69	4884,06	5604,83	3952,89	5061,46	5773,87

	AUGMENT. MARGE (F)			AUGMENT. MARGE (F/ha)		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
ZONE 1	100870	-1290	19890	6,68	-0,09	1,32
ZONE 2	328910	-229000	2699500	17,14	-11,94	140,69
ZONE 3	4942930	4966410	1438160	544,38	546,96	158,39
ZONE 4	7376640	6352730	4871550	793,87	683,68	524,27
ZONE 5	548260	133330	1664380	51,72	12,58	157,02
TOTAL	13297700	11222200	10693500	210,20	177,39	169,04

Annexe 10

Scénario 2 : Comparaisons entre assolements et marge brute dans le système actuel et dans l'optimisation proposée

A. Superficies de chaque culture par zone : comparaison entre les valeurs actuelles , celles résultat de l'optimisation par zone et celles résultat du modèle régional.

Assolement (ha)		BD	BT	MG	MS	SS	SI	TS	TI
ACTUEL	Z1	46	720	252	6	374	76	238	0
	Z2	56	2308	2033	477	715	1119	1143	2
	Z3	60	872	1441	436	202	222	664	28
	Z4	46	677	2429	454	73	189	544	35
	Z5	773	1281	1333	279	86	128	1096	87
	TOTAL	981	5858	7488	1652	1450	1734	3685	152
OPTIMIS. PAR ZONE	Z1	0	511	235	6	586	5	295	75
	Z2	100	1492	2458	120	1458	1096	1064	64
	Z3	100	447	1450	49	978	65	788	47
	Z4	100	442	1500	54	1407	0	945	0
	Z5	342	1112	1427	279	471	48	1185	200
	TOTAL	642	4004	7069	508	4900	1214	4276	386
OPTIMIS. REGIONAL	Z1	0	511	51	6	768	0	376	0
	Z2	100	1492	2050	0	1930	915	1366	0
	Z3	0	547	1450	409	692	263	539	24
	Z4	0	542	1750	500	881	0	774	0
	Z5	269	1185	921	279	865	0	1544	0
	TOTAL	369	4278	6222	1194	5136	1178	4599	24

Avec BD = blé dur MS = maïs semence TS = tournesol sec
 BT = blé tendre SS = sorgho sec TI = tournesol irrigué
 MG = maïs grain SI = sorgho irrigué

B. Marge brute par zone : comparaison entre les valeurs actuelles , celles résultat de l'optimisation par zone et celles résultat du modèle régional.

		Marge brute (kF)	F/ha
ACTUEL	Z1	7050	4118
	Z2	38251	4871
	Z3	23182	5906
	Z4	21001	4722
	Z5	23961	4733
	TOTAL	113445	4932,4
OPTIMIS. PAR ZONE	Z1	7025	4104
	Z2	34764	4427
	Z3	17843	4546
	Z4	16070	3614
	Z5	23547	4651
	TOTAL	99249	4315,2
OPTIMIS. REGIONAL	Z1	7066	4127
	Z2	33224	4231
	Z3	23184	5907
	Z4	22077	4965
	Z5	23408	4623
	TOTAL	108959	4737,3

Annexe 11

Comparaison des résultats obtenus avec les deux scénarios en termes de DIMINUTION de la consommation d'eau et de diminution de la lixiviation par rapport à la situation actuelle

1. Différence entre consommation d'eau, lixiviation des nitrates et marge actuelles et celles ressortissants du scénario 1 (itinéraires techniques optimisés par CropSyst)

DIFFERENCE (BASE-SCENARIO1)						
DIMIN. CONS. EAU (m3)			% DIMINUTION			
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
TOT	3322010	521230	2189050	6,45	1,59	12,81
Z1	-106391	-97992	-67258	-12,83	-16,68	-21,78
Z2	-1870770	-1911035	-810482	-16,10	-25,97	-21,66
Z3	2502200	835822	575024	18,97	10,79	14,22
Z4	3458240	2312540	2829662	18,19	18,66	43,64
Z5	-661256	-618095	-337901	-9,61	-13,44	-13,48

DIMINUTION LIXIVIATION (kgN)			% DIMINUTION			
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
TOT	169420	124383	114863	94,74	56,78	29,43
Z1	1533	684	607	71,17	8,11	3,98
Z2	40154	29779	15546	95,16	51,36	21,06
Z3	40632	26112	9184	96,15	64,90	17,77
Z4	52992	51355	80160	94,07	68,72	41,16
Z5	34112	16454	9364	95,04	43,65	17,10

AUGMENTATION MARGE (F)			% AUGMENTATION			
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
TOT	13297700	11222200	10693500	5,62	3,63	3,02
Z1	100870	-1290	19890	0,38	0,00	0,07
Z2	328910	-229000	2699500	0,39	-0,20	1,99
Z3	4942930	4966410	1438160	7,80	6,27	1,56
Z4	7376640	6352730	4871550	28,08	16,90	11,53
Z5	548260	133330	1664380	1,53	0,28	3,02

2. Différence entre consommation d'eau, lixiviation des nitrates et marge actuelles et celles ressortissants du scénario 2 (assolements optimisés par programmation linéaire)

A. Comparaison entre valeurs actuelles et scénario 2A : modèle optimisé par zone indépendamment

DIFFERENCE (BASE-SCENARIO2A)

	EPARGNE EAU (m3)			% EPARGNE		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
TOT	6596817	4218648	1915364	12,79	12,95	11,24
Z1	53481	21739	-15294	6,45	3,70	-4,95
Z2	-156441	-122500	-82902	-1,34	-1,66	-2,22
Z3	1260350	898702	397003	9,57	11,76	9,94
Z4	5626000	3575050	1733300	29,60	28,85	26,73
Z5	-186573	-154344	-116742	-2,71	-3,36	-4,66

	DIMINUTION LIXIVIATION (kgN)			% DIMINUTION		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
TOT	106604	68151	98395	59,04	36,94	24,33
Z1	1042	2303	3550	46,45	26,40	20,00
Z2	26351	6801	17485	62,43	20,00	23,67
Z3	29991	22255	14926	69,76	54,81	28,72
Z4	42030	32035	51470	73,51	41,41	24,98
Z5	7190	4758	10964	20,00	20,00	20,00

	AUGMENTATION MARGE (F)			% AUGMENTATION		
	AS	AM	AH	AS	AM	AH
TOT	-11427502	-15222602	-12769930	-13,83	-12,86	-9,88
Z1	-161818	-72491	384151	-3,73	-0,98	4,43
Z2	-3254907	-3756100	-2477968	-12,21	-9,40	-5,54
Z3	-3617883	-5691014	-5843947	-20,10	-23,56	-23,29
Z4	-4006304	-5210611	-4764312	-24,47	-23,77	-21,21
Z5	-386589	-492385	-67855	-2,25	-1,98	-0,24

B. Comparaison entre valeurs actuelles et scénario 2B : modèle optimisé au niveau régional

DIFFERENCE (BASE-SCENARIO2B)

		EPARGNE EAU (m3)			% EPARGNE		
		AS	AM	AH	AS	AM	AH
TOT		5447650	3682083	1854358	10,57	11,30	10,89
Z1		478000	334600	167300	57,65	56,95	54,17
Z2		1125400	788200	394800	9,65	10,71	10,55
Z3		-8650	-1817	658	-0,07	-0,02	0,02
Z4		2840000	1833800	897500	14,94	14,80	13,84
Z5		1012900	727300	394100	14,70	15,81	15,73

		DIMINUTION LIXIVIATION (kgN)			% DIMINUTION		
		AS	AM	AH	AS	AM	AH
TOT		56413	38172	80886	31,24	20,69	20,00
Z1		1167	2511	2673	52,03	28,78	15,06
Z2		35878	8118	19154	85,00	23,88	25,93
Z3		2885	3402	9959	6,71	8,38	19,16
Z4		7750	18613	39339	13,55	24,06	19,10
Z5		8733	5528	9761	24,29	23,24	17,81

		DIMINUTION MARGE (F)			% DIMINUTION		
		AS	AM	AH	AS	AM	AH
TOT		-6692171	-4805030	-99687	-8,10	-4,06	-0,08
Z1		-499027	-1654	763929	-11,50	-0,02	8,81
Z2		-5169500	-5349688	-3277713	-19,39	-13,38	-7,32
Z3		-19982	4502	18630	-0,11	0,02	0,07
Z4		226353	1131066	1903377	1,38	5,16	8,47
Z5		-1230013	-589256	492090	-7,14	-2,37	1,74