

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

**Analyse de la relation
entre les pratiques agricoles,
la qualité des sols et la productivité.
Un modèle bio-économique récursif**

Wassim Ben Aoun

Série « Master of Science » n° 117

2012

**Institut Agronomique Méditerranéen de
Montpellier**



CIHEAM
IAM MONTPELLIER

**Analyse de la relation
entre les pratiques agricoles,
la qualité des sols et la productivité.
Un modèle bio-économique récursif**

Wassim Ben Aoun

Série « Master of Science » n° 117

2012

**Analyse de la relation entre les pratiques agricoles, la qualité des sols
et la productivité. Un modèle bio-économique récursif**

Wassim Ben Aoun

Série « Master of Science » n° 117

2012

Série Thèses et Masters

Ce Master est le numéro 117 de la série *Master of Science* de l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier.

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

Le *Master of Science* du Centre International de Hautes Etudes Agronomiques Méditerranéennes :
Analyse de la relation entre les pratiques agricoles, la qualité des sols et la productivité. Un modèle bio-économique récuratif

a été soutenu par **Wassim Ben Aoun** 29 août 2011 devant le jury suivant :

M. Hatem Belhouchette, Enseignant-chercheur, CIHEAM-IAMM.....Président
M. Jean-Marie Boisson, Professeur, Université Montpellier I Membre
M. Guillermo Flichman, Professeur associé, CIHEAM-IAMM Membre

Le travail de recherche a été encadré par Guillermo Flichman.

CIHEAM-IAMM

Institut agronomique Méditerranéen de
Montpellier

Directeur : Vincent Dollé

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

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

ISBN : 2-85352-480-9 ; ISSN : 0989-473X

Numéros à commander au
CIHEAM- IAMM
Bureau des Publications
e-mail : tigoulet@iamm.fr
Prix : 50€
© CIHEAM, 2012

Fiche bibliographique

Ben Aoun (Wassim) – Analyse de la relation entre les pratiques agricoles, la qualité des sols et la productivité. Un modèle bio-économique récursif – Montpellier : CIHEAM-IAMM - 74p. (Master of Science, IAMM, 2012, n°117)

Résumé : En Europe, les processus de dégradation des sols représentent une menace pour la durabilité de l'utilisation des terres agricoles, auxquels on peut rajouter la diminution de la disponibilité des sols en quantité. Face à la vulnérabilité des terres agricoles due à une détérioration de leur qualité, le risque de perte de productions et de revenus devient de plus en plus grand.

Ce travail se propose de caractériser les processus de dégradation de la qualité des sols et d'analyser ses relations avec les pratiques agricoles afin de représenter le comportement à long terme d'un agriculteur et dont l'objectif va être de maximiser le profit sous différentes contraintes.

Appliqué sur une exploitation de la région Midi-Pyrénées, le modèle développé est un modèle bioéconomique récursif qui nous permet de caractériser le comportement de l'agriculteur et l'état de la qualité du sol à différents moments de l'horizon de planification. Nous retenons ici comme indicateur de la dégradation irréversible, la perte du sol en raison de l'érosion. Nous construisons un méta modèle linéaire pour actualiser les rendements et les niveaux de perte de sol à chaque début de chaque sous période. Nous faisons l'hypothèse que l'agriculteur peut s'investir dans la lutte contre la détérioration de la qualité du sol en adoptant un système basé sur l'entretien minimal des terres. L'agriculteur fait donc un arbitrage entre exploiter son sol en y exerçant une pression aujourd'hui au détriment des rendements futurs ou investir dans la qualité du sol aujourd'hui pour en tirer des bénéfices plus tard. Ensuite, nous cherchons à déterminer l'instrument de politique le plus efficace qui permet de garantir une utilisation durable des sols et une stabilisation des revenus.

Les principaux résultats obtenus au terme de ce travail se concentrent autour des éléments suivants : la qualité du sol est différente de la fertilité des sols, les sols européens se dégradent, c'est l'activité de production qui détermine le niveau de dégradation et non pas le produit, la présence d'un système de taxation et de subventionnement est indispensable pour garantir une utilisation durable des terres agricoles.

Mots-clés : Qualité du sol, activité de production, érosion, modèle bio-économique récursif, méta-modèle, taxe, subvention.

Analysis of the relationship between agricultural practices, soil quality and productivity - A recursive bio-economic model

Summary: *In Europe, the processes of land degradation threaten the sustainability of using agricultural land, which can be added to the decrease in land availability in quantity. Given the vulnerability of agricultural lands due to a deterioration of their quality, risk of loss of production and income is becoming greater.*

This work aims to characterize the degradation of soil quality and to analyze its relationship with agricultural practices in order to represent the behaviour of a farmer whose long-term goal will be to maximize the profit under different constraints.

A recursive bio-economic model applied to a farm in the Midi-Pyrenees has been done to characterize the behaviour of the farmer and the state of soil quality at different times of the planning horizon. We used here soil loss due to erosion as an indicator of irreversible degradation. We build a linear meta model to update yields and levels of soil loss in the beginning of each period. We assume that the farmer is involved in the combat against the deterioration by adopting a system based on minimal maintenance of the land. The farmer is thus making a trade-off between exploiting its soil by exerting pressure today to the detriment of future performance or invests in the quality of the soil today to reap the benefits later. Then, we seek to determine the policy instrument that allows a sustainable use of agricultural land and income stabilization.

The main results obtained from this work focus on the following aspects: The quality of the soil is different from soil fertility, European soils are degraded, the production activity determines the level of degradation, the presence of a system of taxation and subsidy is essential to ensure sustainable use of soils.

Key-words: *Soil quality, production activity, erosion, recursive bio-economic model, meta-model, tax, subsidy*

Remerciements

Ce mémoire de recherche a été préparé à l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier (IAMM).

Je voudrais exprimer ma profonde reconnaissance à mon maître de stage Monsieur **Guillermo Flichman**, professeur associé à l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier qui m'a aidé par ses encouragements et son soutien permanent afin de mener ce travail à bien et dans les meilleures conditions.

Je remercie aussi Monsieur **Jean-Marie Boisson**, professeur à la faculté des sciences économiques de l'université de Montpellier 1, qu'il trouve ici l'expression de ma profonde gratitude et de mon profond respect pour sa compétence et son expérience et pour avoir accepté faire partie du jury de cette soutenance.

Je voudrais exprimer également mes sincères remerciements et ma reconnaissance à Monsieur **Hatem Belhouchette**, enseignant chercheur à l'Institut Agronomique Méditerranéen de Montpellier. Je le remercie aussi pour sa disponibilité et ses qualités humaines.

Glossaire

AEE : Agence Européenne de l'Environnement

CC : Changement Climatique

CE : Commission Européenne

CO₂ : Dioxyde du Carbone

GES : Gaz à Effet de Serre

MOS : Matière Organique du Sol

MEEDDM : Ministère de l'Ecologie, de l'Energie, du Développement Durable et de la Mer

OCDE : Organisation de Coopération et de Développement Economique

PAC : Politique Agricole Commune

SAU : Superficie Agricole Utile

SOCO : *Sustainable Agriculture and Soil Conservation*

SSSA : *Soil Science Society of America*

UE : Union Européenne

Table des matières

Introduction générale	1
Problématique	7
Chapitre I	9
Le sol : caractérisation agronomique et implications économiques	9
I. Importance de la qualité des sols dans la production agricole.....	10
1. Le sol : caractérisation agronomique.....	10
2. Le sol, le carbone et la matière organique.....	10
3. Fertilité des sols Vs Qualité des sols	11
A. Fertilité des sols.....	11
B. Qualité des sols.....	11
a. Les indices de qualité des sols.....	12
b. Les indicateurs de qualité des sols	13
II. Les phénomènes de dégradation des sols en Europe	13
1. Le Constat	13
2. Les processus de dégradation des sols en Europe	13
A. L'érosion	14
B. Le déclin de la teneur en matière organique du sol	14
C. La salinisation	15
D. La compaction	15
E. Le glissement des terres	15
F. La contamination par les polluants.....	15
G. Le déclin de la biodiversité	15
H. L'imperméabilisation des sols.....	15
III. Les instruments de protection des sols	16
1. La politique américaine	16
2. La politique européenne	17
IV. Conclusion.....	18
Chapitre II.....	21
Traitement des problèmes de gestion des ressources naturelles: le cas du sol	21
I. Le sol : ressource renouvelable ou non renouvelable ?	22
II. La dégradation de la qualité du sol comme production jointe de l'activité agricole.....	22
III. Estimation des fonctions de production	23
1. La fonction de production d'ingénieur	23
2. Le raisonnement par activité de production.....	24
IV. Importance du caractère dynamique de la qualité du sol	25
V. Les méthodes de résolution des problèmes de gestion des ressources naturelles	26
1. Les modèles dynamiques d'optimisation inter temporelle	26
A. Les modèles déterministes.....	26
B. Les modèles stochastiques.....	26
a. Les modèles stochastiques à une seule décision.....	26
b. Les modèles stochastiques à plusieurs décisions séquentielles.....	26
2. Les modèles récursifs.....	26
3. L'optimisation dynamique non séquentielle.....	26
4. L'optimisation dynamique séquentielle.....	27
A. La programmation stochastique dynamique.....	27
B. La programmation stochastique discrète	27
C. La programmation stochastique récursive	27
VI. Synthèse	27

1. Quel indicateur de qualité du sol ?.....	28
2. La dégradation de la qualité du sol : dynamique ou statique ?	28
3. La dégradation de la qualité du sol : stochastique ou déterministe ?	28
Chapitre III.....	29
Comportement économique face à une dégradation de la qualité des sols : le cas de l'érosion dans la région Midi-Pyrénées	29
Introduction.....	30
I. Intérêt pour la modélisation bioéconomique	31
1. Les modèles agronomiques.....	31
2. Les modèles économiques	32
II. Revue de la littérature.....	34
III. Quelques orientations pour la spécification du modèle.....	35
1. Insertion de la technologie dans le modèle.....	35
2. Considération des effets hors site de la dégradation.....	35
3. L'atténuation de l'érosion : la clé de la conservation de la qualité du sol.....	35
4. Le modèle bioéconomique retenu : un modèle récursif.....	36
IV. Méthodologie.....	37
1. Choix de la zone d'étude	38
2. Les activités productives.....	38
3. Le système de conservation : outil d'atténuation de l'érosion.....	39
4. Origine des données économiques et biophysiques.....	39
5. Le modèle bioéconomique.....	39
A. Présentation générale.....	39
B. La fonction objectif	40
C. Les contraintes technico-économiques.....	41
a. Occupation du sol.....	41
b. Les précédents cultureux	42
D. Obligation de la jachère.....	42
E. Considération de l'érosion.....	43
6. Introduction de la récursivité dans le modèle : le méta modèle linéaire.....	43
A. Réinitialisation du stock du sol perdu	44
B. Réinitialisation des rendements	44
V. Exécution du modèle	45
1. Modèle sans aucune intervention publique.....	45
2. Modèle avec une taxe sur l'adoption d'un système conventionnel	48
3. Modèle avec une subvention sur l'adoption d'un système de conservation.....	51
4. Modèle avec subvention et taxe.....	53
VI. Comparaison des résultats	56
1. Comparaison des niveaux d'utilité	56
2. Comparaison des niveaux d'érosion	57
3. Analyse coût efficacité	58
4. Discussion des résultats	58
Conclusion générale	60
Bibliographie	61
Annexes	64

Liste des figures

Figure 1 : Evolution des rendements des produits agricoles en France.....	7
Figure 2 : Le Raisonnement par activité de production.....	25
Figure 3 : Présentation d'un modèle bioéconomique	33
Figure 4 : Principe de la modélisation récursive	37
Figure 5 : Evolution des superficies par système (ha).....	47
Figure 6 : Evolution de la valeur de l'utilité de l'agriculteur (sans aucune intervention publique)	47
Figure 7 : Erosion totale de l'exploitation en tonnes (sans aucune intervention).....	48
Figure 8 : Evolution des superficies par système en ha (avec taxe)	49
Figure 9 : Evolution de la valeur de l'utilité de l'agriculteur (taxe).....	50
Figure 10 : Erosion totale de l'exploitation en tonnes (taxe)	50
Figure 11 : Evolution des superficies par système en ha (avec subvention)	52
Figure 12 : Evolution de la valeur de l'utilité de l'agriculteur (subvention)	52
Figure 13 : Erosion totale de l'exploitation en tonnes (subvention).....	53
Figure 14 : Evolution des superficies par système en ha (avec taxe et subvention).....	54
Figure 15 : Evolution de la valeur de l'utilité de l'agriculteur (taxe et subvention)	55
Figure 16 : Erosion totale de l'exploitation en tonnes (taxe et subvention)	55
Figure 17 : Comparaison entre les différents niveaux d'utilité	56

Liste des tableaux

Tableau 1 : Principales caractéristiques du modèle retenu.....	37
Tableau 2 : Présentation des composantes des activités productives.....	39
Tableau 3 : Comparaison entre assolement réel et assolement simulé.....	46
Tableau 4 : Evolution des superficies par culture et par système en ha (sans intervention)....	46
Tableau 5 : Résultats de l'exploitation en absence d'intervention publique.....	48
Tableau 6 : Evolution des superficies par culture et par système en ha (avec une taxe).....	49
Tableau 7 : Résultats de l'exploitation en présence d'une taxe.....	51
Tableau 8 : Evolution des superficies par culture et par système en ha (subvention).....	51
Tableau 9 : Résultats de l'exploitation en présence d'une subvention.....	53
Tableau 10 : Evolution des superficies par culture et par système en ha (avec taxe et subvention).....	54
Tableau 11 : Résultats de l'exploitation en présence d'une taxe et une subvention.....	56
Tableau 12 : Estimation du coût social.....	58

Liste des cartes

Carte 1 : Risque d'érosion des terres européennes.....	36
--	----

Introduction générale

Dans le contexte actuel de progrès technique et des nouvelles technologies de l'information et de la communication, le monde connaît une accélération de l'activité de tous les secteurs de l'économie.

Au cours des dernières décennies, on a assisté à un accroissement important de la population mondiale. Par conséquent, la réalisation de l'objectif de sécurité et de souveraineté alimentaire devient de plus en plus difficile. Pourtant, l'intensification de l'agriculture conventionnelle a permis d'augmenter les rendements des produits agricoles et donc l'offre mondiale des denrées alimentaires. Bien entendu, cette intensification a aussi assuré un niveau de revenu agricole plus confortable.

En effet, l'agriculture joue un rôle décisif dans la garantie de la pérennité de la vie humaine grâce aux différents services qu'elle offre à la société. Selon un comportement purement rationnel, les agriculteurs se sont investis dans l'exploitation des ressources naturelles renouvelables et non renouvelables afin de dégager le maximum de profit.

L'épuisement des ressources naturelles en quantité et en qualité menace le développement durable et crée des dégâts pour l'environnement. Actuellement, des ressources naturelles comme l'eau et le sol, moteurs de la production agricole, ne cessent de se raréfier. Ainsi, une forte pression sur le processus de production a pris place en raison de cette rareté.

Certes, le sol est un capital naturel offrant plusieurs fonctions importantes sur tous les plans notamment sur le plan environnemental. C'est un milieu extrêmement complexe présentant des mutations considérables en termes de propriétés physiques, chimiques et biologiques (CE, 2006). A présent, la disponibilité de cette ressource en quantité et en qualité fait défaut. Sachant que le développement durable de l'agriculture passe par le maintien des terres agricoles en bonne qualité, des questions sur les répercussions des pratiques agricoles sur la durabilité de ces terres commencent à se poser.

Tous les systèmes socio-économiques du monde recommandent une utilisation durable des ressources naturelles. Le concept de développement durable a pris naissance dans le rapport de Brundtland (1987) qui le perçoit comme « un développement qui répond aux besoins du présent sans compromettre la capacité des générations futures pour répondre à leurs propres besoins » (Toth *et al.*, 2007). En ce qui concerne les sols, une utilisation durable de ces derniers renvoie à leur maintien en bonne qualité face aux différentes contraintes environnementales. En se plaçant sous un angle purement économique, le maintien de la productivité agricole et d'un niveau confortable de revenus passe par la prévention et l'amélioration de la qualité des sols. Ainsi, les exploitants agricoles doivent tenir compte de trois impératifs essentiels : le maintien de la fertilité des sols, la préservation de la qualité de l'environnement et la protection de la santé des végétaux aussi bien que des animaux et des êtres humains (OCDE, 2000).

Plusieurs parties du monde souffrent largement de la détérioration de la qualité des sols et l'Europe se trouve très concernée par cette question. Au cours des dernières années, la recrudescence des processus de dégradation des sols y a été assez remarquable (CE, 2006). Même si le problème est connu depuis plusieurs années, il a fallu attendre juin 2003 pour assister à la naissance de mesures en faveur de la protection des sols à travers l'introduction de l'éco-conditionnalité et des mesures agro-environnementales dans le cadre de la politique agricole commune (PAC) (Ghali, 2007).

Sans aucun doute, le problème de dégradation des sols concernent les différents acteurs (agriculteurs, décideurs publics) et son atténuation demeure indispensable pour préserver les terres ainsi que les revenus agricoles.

On s'interroge alors sur le degré de vulnérabilité des sols européens aux différents processus de dégradation et les raisons qui ramènent la majorité des agriculteurs européens à ne pas se rendre compte de la vraie ampleur du problème de dégradation de leurs sols. Nous pouvons discuter aussi le recours à un instrument de politique publique telle qu'une taxe ou une subvention pour garantir la conservation du sol.

Dans un premier chapitre, nous ferons une mise au point sur le concept de qualité des sols ainsi que sur les différents processus de dégradation de la qualité des sols. Une brève description des politiques

existantes de conservation des sols y est également faite. Dans un deuxième chapitre, nous soulignerons l'utilité de considérer la dégradation de la qualité du sol comme une production jointe de l'activité agricole et l'importance d'insister sur le fait que c'est l'activité de production qui entraîne la dégradation et non pas le produit. Une présentation des différentes méthodes de résolution des problèmes de gestion des ressources a été avancée. Dans un troisième chapitre, nous présenterons une description des modèles bioéconomiques et une justification du choix du modèle à utiliser dans l'application empirique. Le présent travail est clôturé par l'interprétation des résultats obtenus et ce dans le but d'aider à la décision pour garantir une utilisation durable des terres agricoles.

Il faut différencier la qualité des sols et la fertilité des sols, cependant ces deux termes sont souvent confondus. C'est l'entretien de la qualité du sol qui nous intéresse ici. Dans un essai pour analyser les relations entre les pratiques agricoles, la qualité des sols et leurs effets sur la productivité, nous avons construit un modèle bioéconomique récursif. Nous avons retenu les niveaux d'érosion (la perte du sol) comme indicateur permettant de juger la qualité du sol. Le modèle nous a permis d'étudier le comportement d'un agriculteur face à la dégradation de son sol sous différentes situations. L'introduction de la récursivité nous a permis de suivre l'évolution de ce comportement au fur et à mesure avec le changement de l'état de la qualité du sol à long terme. Les résultats montrent que la décision de l'agriculteur de s'investir sur l'entretien de la qualité de son sol moyennant l'adoption d'un système de culture basé sur le labour réduit doit être encouragée pour garantir une utilisation durable des terres agricoles. Il s'est avéré que la mise en place d'une taxe sur l'adoption d'un système conventionnel et d'une subvention pour l'utilisation d'un système de conservation s'annonce comme l'instrument le plus efficace pour conserver les terres agricoles et stabiliser les revenus.

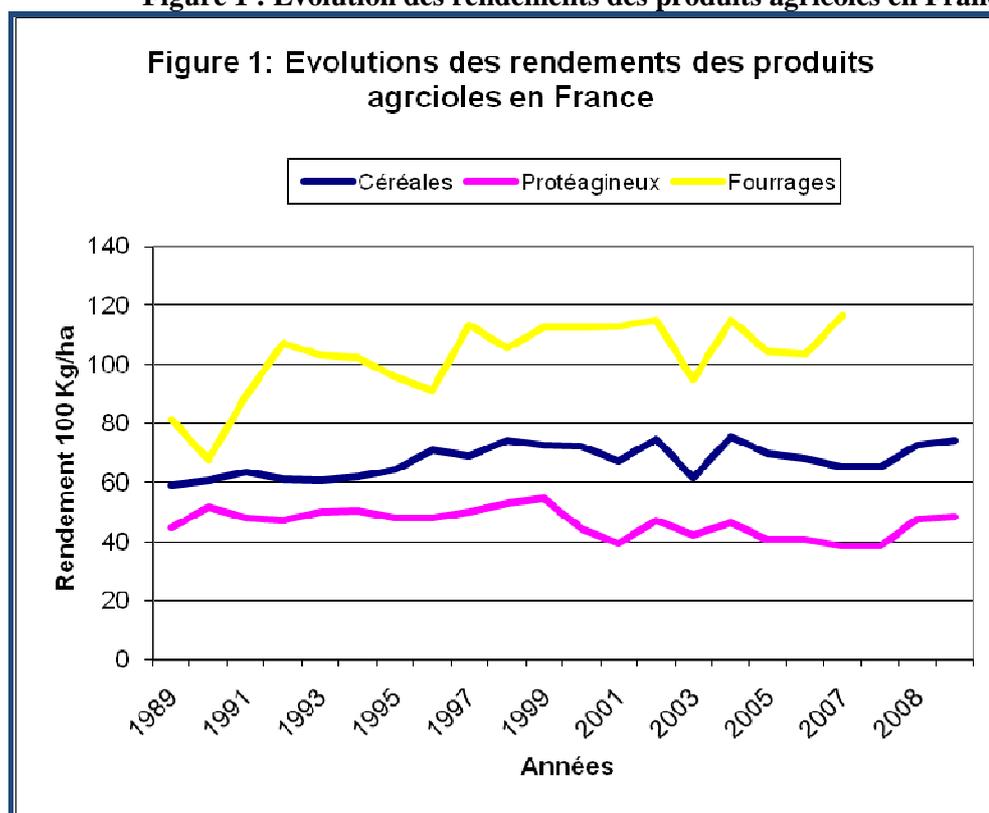
Cette étude représente une extension de celle réalisée dans le cadre de préparation du diplôme d'études approfondies (Ben Aoun, 2010). Elle comporte deux points de renforcement : le premier concerne le principe de raisonnement basé sur l'activité de production et le recours à la modélisation bioéconomique qui permet de surpasser la complexité des modèles économiques classiques de contrôle optimal. Le second point concerne l'application empirique qui explicite mieux la relation entre l'activité productive et la dégradation du sol représentée par le phénomène d'érosion dans notre cas.

Problématique

Durant les dernières décennies, on a assisté à une dégradation importante des sols résultant de l'intensification de l'agriculture et de la dissociation des productions végétales et animales. Il s'agit aujourd'hui d'un sujet d'actualité qui préoccupe les scientifiques et les décideurs dans divers pays. L'intensité de la dégradation diffère selon sa nature et affecte directement la qualité des sols.

D'ailleurs, malgré l'existence de plusieurs facteurs (le progrès technique, le progrès génétique, les gaz à effet de serre) servant à amplifier le volume de la production agricole française, l'une des premières agricultures au monde, les rendements ont connu une stagnation depuis une dizaine d'années. Cela peut mettre en évidence la dégradation de la qualité intrinsèque des sols : les sols européens craquent.

Figure 1 : Evolution des rendements des produits agricoles en France



Source : Agreste, 2010

La dégradation du sol est un phénomène dont la complexité a été prouvée par les spécialistes des sciences du sol et qui a des conséquences néfastes sur l'environnement. En effet, les processus de dégradation des sols sont dus à des phénomènes naturels tels que le changement climatique (cc) en plus des activités humaines inadéquates. Toutefois, l'ampleur de la dégradation est souvent mal mesurée.

Il existe généralement un décalage entre la manifestation d'une dégradation et la constatation initiale du problème par les exploitants. Donc, tant que les agriculteurs n'enregistrent pas de chutes de revenus sur une courte période, ils ne seront pas motivés pour s'investir dans la protection de la qualité de leurs sols et dans son amélioration alors que pas mal de travaux (FAO, 2003 et CE, 2006) insistent sur le fait que les perceptions des agriculteurs sont au centre du processus décisionnel.

Ainsi, il semble que plusieurs acteurs banalisent l'accélération de la dégradation de la qualité des sols. Du coup, les différents concepts du développement durable comme la sécurité alimentaire et la lutte contre la

pauvreté seront menacés. Cette ignorance de la part des agriculteurs peut être due à plusieurs facteurs à la fois économiques et biophysiques (prix, rendements, etc.).

L'objectif de ce travail est de faire le point sur le concept et les enjeux de la qualité du sol et d'essayer d'analyser le comportement d'un agriculteur face à une dégradation de son sol sur le long terme et en présence d'une intervention publique. La réalisation de cet objectif se base sur un modèle bioéconomique récursif appliqué sur une exploitation agricole dans la région Midi Pyrénées.

Un résultat plausible est enfin souhaité par ce travail qui s'avère indispensable pour fournir une indication sur la nature des actions à entreprendre par les décideurs publics à l'amont et à l'aval du secteur agricole. Cependant, des grandes questions peuvent toujours se poser :

- la dégradation du sol est-elle vraiment fréquente en Europe ?
- quels sont les déterminants qui rentrent dans le processus décisionnel des agriculteurs ?
- des instruments de politiques sont-ils indispensables pour atténuer l'érosion du sol ?

Après avoir présenté la problématique et l'objectif du travail, ce document sera structuré de la manière suivante : dans la partie bibliographique, une esquisse sur la ressource sol ainsi qu'un aperçu sur l'importance de la notion de qualité des sols seront traités. Ensuite, une caractérisation des processus de dégradation de la qualité des sols en Europe ainsi qu'une revue des politiques correspondantes sont menées afin de mieux comprendre le problème. Après avoir fait le point sur les facteurs influençant les décisions de conservation de la qualité des sols, la partie méthodologique soulignera l'importance du raisonnement basé sur l'activité de production et portera sur une modélisation du comportement économique d'un agriculteur face à une dégradation de son sol. Le document sera clôturé par une analyse des résultats obtenus ainsi que par une conclusion générale.

Chapitre I

Le sol : caractérisation agronomique et implications économiques

I. Importance de la qualité des sols dans la production agricole

1. Le sol : caractérisation agronomique

Le sol constitue l'épiderme vivant de la Terre, recouvrant les roches et rendant la vie possible. A l'instar de l'air et de l'eau, il fait partie du support de la vie humaine (AEE, 2010). Il existe de multiples définitions des sols qui diffèrent selon le champ d'application. Pour les agriculteurs et les horticulteurs, le sol est connu comme la partie travaillée par les outils du labour (bêche et charrue), soit sur une épaisseur de 30 centimètres en moyenne qui définit la terre végétale. Cette dernière constitue la couche superficielle du sol qui supporte le tapis végétal composé en grande partie de 4 éléments principaux : l'humus, l'argile, le limon et le sable. En effet, le sol est formé par 4 composantes fondamentales à savoir :

- **les constituants minéraux** : ils résultent de la désagrégation physique et de l'altération biochimique des roches ;
- **la matière organique** : c'est la matière consommable qui constitue la nourriture du sol et de la plante, elle provient de la décomposition d'une partie ou de la totalité des végétaux ou animaux d'origine aérienne ou souterraine et elle a un effet positif sur la productivité du sol ;
- **les éléments chimiques** : ils forment une sorte de nourriture pour la plante, ils sont contenus dans les constituants solides du sol (argiles, limons, matière organique) ;
- **l'eau et l'air.**

Ainsi, le sol représente une faible quantité de terres fertiles qui servent à nourrir l'ensemble de la population. Il s'agit d'un capital naturel qui fournit les caractéristiques physiques, chimiques et biologiques indispensables pour le processus de croissance des plantes, il stocke, régule et partage la circulation de l'eau dans l'environnement ainsi qu'il atténue les changements environnementaux à travers l'assimilation des déchets. De plus, c'est une ressource qui se trouve souvent en compétition avec les constructions et les routes.

En fait, le sol joue un rôle multifonctionnel, il est à la base de 90% de l'alimentation humaine et animale ainsi qu'il s'agit du support de plusieurs établissements humains tels que les logements, les infrastructures, les lieux de divertissement et de mise en décharge, la formation de l'essentiel du paysage et du patrimoine culturel... (Ghali, 2007). Le président de l'association européenne pour la conservation du sol, José Luis Rubio, a donc raison de percevoir le sol comme un lien crucial entre les problèmes environnementaux mondiaux notamment le changement climatique, la gestion de l'eau et l'appauvrissement de la biodiversité (AEE, 2010).

2. Le sol, le carbone et la matière organique

Le sol contient deux fois plus de carbone organique que la végétation. Les sols de l'UE sont composés de plus que 70 milliards de tonnes de carbone organique, soit environ 7% de la totalité du budget carbone mondial. Ce chiffre prend son sens quand on sait que les Etats membres émettent deux milliards de tonnes de carbone chaque année. Les sols constituent donc un élément décisif dans le changement climatique et dans l'atténuation de la pollution de l'air par le CO₂ (AEE, 2010). D'ailleurs, même une infime perte du carbone stocké dans les sols européens peut masquer les économies d'émission du CO₂ dans d'autres secteurs de l'économie.

La substance clé dans la relation entre sol et stockage du carbone est la matière organique du sol (MOS). Il s'agit de la somme de la matière vivante et morte dans le sol, elle comprend des déchets des végétaux et des animaux. A échelle microscopique, la MOS constitue un écosystème complet : c'est une ressource extrêmement précieuse qui réalise des fonctions pour l'environnement et l'économie. Quand la matière organique est intégrée au sol, il y a 3 réactions principales :

- **la production de CO₂** : la décomposition de la matière organique est une réaction d'oxydation par les micro-organismes du sol qui produit du CO₂, de l'eau, et de l'énergie.
- **la minéralisation** : les plantes absorbent des éléments nutritifs du sol sous forme « minérale » et les transforment en molécules « organiques » (cellulose, lignine, fleurs...). Le terme « minéral » ne veut pas dire que les éléments nutritifs sont sous forme de cristaux, ils sont simplement sous

forme inorganique de cations/anions dans l'eau du sol. La décomposition de la matière organique transforme les molécules organiques sous forme minérale de nouveau, restituant ainsi les éléments nutritifs au sol pour être assimilés de nouveau par d'autres plantes.

- **l'humification** : le stade final de la décomposition est la production de molécules complexes appelées « humus ». Le terme « humus » est parfois utilisé par le public de deux manières différentes : la litière qui recouvre la surface du sol en forêt, et les molécules complexes qui possèdent des propriétés similaires aux argiles (une charge électrostatique et une grande superficie). Seul le deuxième sens a de l'importance pour la stabilité structurale du sol. L'humus se décline sous forme humique ou fulvique, et contribue beaucoup à la stabilité structurale du sol. L'humus s'attache aux argiles pour former le « complexe argilo-humique » (Fox, 2008).

La matière organique est donc un constituant important du sol et une source d'énergie pour les organismes vivant dedans : c'est la base de la fertilité des terres agricoles (CE, 2006). Ainsi, elle contribue fortement à la conservation et à l'amélioration des propriétés physiques, chimiques et biologiques des sols.

A l'échelle européenne, les terres agricoles montrent des niveaux de matière organique le plus souvent moyens à faibles. Quel que soit le degré de teneur d'un sol en matière organique, le risque de déclin de cette teneur reste important. Ainsi, il est indispensable de faire attention au déclin des taux de matière organique qui ne peut qu'accélérer l'occurrence des processus de dégradation des sols notamment l'érosion avec des répercussions néfastes sur l'environnement.

3. Fertilité des sols Vs Qualité des sols

Il est notable que les deux termes fertilité et qualité sont souvent confondus alors qu'ils n'ont pas la même interprétation.

A. Fertilité des sols

Morel (1989) définit la fertilité d'un sol comme la facilité avec laquelle la racine peut bénéficier des différents facteurs de croissance dans un sol : chaleur, eau, éléments chimiques, substances organiques de croissance...

Haberli *et al* (1990) affirment que le sol n'est fertile que lorsqu'il présente une faune et flore variées et biologiquement actives ainsi qu'une structure typique et une capacité de dégradation intacte, lorsqu'il permet une croissance normale des végétaux sans nuire à leurs propriétés et lorsqu'il garantit une bonne qualité des produits (cités par Chitrit, 2008).

Bien entendu, tout sol présente des propriétés physico-chimiques et biologiques qui lui sont propres. Les facteurs de dégradation de la fertilité des sols se concentrent autour de la matière organique, la fertilisation NPK et la pollution par les métaux lourds.

B. Qualité des sols

La capacité de ressources contenues dans un sol à fonctionner correctement et à assurer un flux durable des services productifs repose sur le maintien et l'amélioration de la qualité du sol (Tizale, 2007). La variété des paysages, les traditions d'utilisation des terres, les milieux sociaux, les écoles scientifiques et beaucoup d'autres facteurs ont abouti à une diversité de définitions et d'interprétation du terme qualité du sol : la FAO (1976) la définit comme un attribut complexe de la terre qui agit d'une manière distincte dans son influence sur l'aptitude des terres pour un type spécifique d'utilisation (citée par Toth, 2007). Le comité pour la société de la science du sol d'Amérique explique la qualité du sol comme étant l'aptitude d'un type particulier de sol à fonctionner avec ses capacités et dans la limite des écosystèmes naturels ou aménagés afin de maintenir la productivité végétale et animale ainsi que la qualité de l'eau et de l'air en plus de soutenir la santé humaine et l'habitation. Selon Dumansky et Pieri (1997), la qualité de la terre (sol, eau et végétation) renvoie à sa capacité d'être utilisée d'une façon durable et de gérer les problèmes

de l'environnement (citée par Tizale, 2007). La définition la plus récente est celle de Toth (2007) qui dit que la qualité d'un sol renvoie à sa capacité de fournir des services aux écosystèmes et à la société grâce à ses aptitudes à s'acquitter de ses fonctions et de répondre aux influences extérieures.

La mesure de la qualité du sol est difficile parce qu'il s'agit de juger une variable présentant des mutations importantes au fil du temps et se trouvant affectée par la nature de la gestion du sol. En effet, il existe deux procédés de mesure de la qualité des sols : les indices, et les indicateurs.

a] Les indices de qualité des sols

Les indices présentent un outil d'évaluation du changement de la qualité d'un sol. Selon la vision associée au terme qualité du sol, on reconnaît l'existence de deux sortes d'indices :

- **les indices avec une vision traditionnelle** : basés sur les propriétés des sols et sur sa durabilité face à des utilisations diverses. Elle permet d'établir le suivi de la qualité du sol et d'estimer l'étendue des terres cultivables aux risques de dégradation. Cette vision est limitée par le fait qu'elle est basée sur des états physiques qui se rapportent à des terres cultivées (productivité, utilisation des inputs) ;
- **les indices avec une vision dynamique** : on utilise des mesures qui peuvent refléter les propriétés dynamiques et la manière avec laquelle le sol est géré telles que la profondeur, l'humidité, l'intensité de culture, la gestion des résidus, la teneur en matière organique... (Tizale, 2007).

Il est notable que dans la littérature, la profondeur du sol et la teneur en matière organique sont considérées comme variables proxy représentant les différents aspects de la qualité du sol.

Les indices de qualité des sols sont représentés par trois composantes principales :

- une composante productivité : capacité d'améliorer la productivité des cultures par les sols ;
- une composante environnementale : capacité d'atténuer les contaminants de l'environnement, les agents pathogènes et les dommages extérieurs ;
- une composante santé : étude des liens qui peuvent exister entre la qualité des sols et les végétaux, les animaux et les êtres humains.

Perr et al. (1992) [cités par Tizale, 2007] ont développé un indice de qualité du sol (*Soil quality index*) de la manière suivante :

$$SQ = f(SP, P, E, H, ER, BD, FQ, MI)$$

Avec :

SQ : indice de qualité du sol

H : santé

SP : propriétés du sol

ER : érodibilité

P : productivité potentielle

BD : diversité biologique

E : facteurs environnementaux

FQ : qualité de l'aliment

MI : inputs de gestion

Doran et Parken (1994) [cités par Tizale, 2007] ont aussi conçu un autre indice de qualité du sol :

$$SQ = f(SQE1, SQE2, SQE3, SQE4, SQE5, SQE6)$$

Avec :

SQE1 : production de nourriture et des fibres

SQE2 : émotivité

SQE3 : qualité des eaux souterraines

SQE4 : qualité des eaux de surface

SQE5 : qualité de l'air

SQE6 : qualité de la nourriture

Ces deux indices diffèrent par les entités qui les forment, mais convergent vers l'estimation de la qualité du sol. Bien entendu, ils ne sont pas exhaustifs mais nous donnent une idée sur la façon avec laquelle nous pouvons utiliser plusieurs indicateurs pour prévoir un indice.

b] Les indicateurs de qualité des sols

Les indicateurs de qualité des sols sont les composants d'un indice, ce sont des attributs du sol qui influencent sa capacité à effectuer la tâche de la production agricole ainsi que les fonctions environnementales. Parmi ces indicateurs, on trouve la profondeur du sol, la matière organique, la respiration, l'agrégation, la texture, la densité apparente, la disponibilité des éléments nutritifs etc. Il existe une sorte de corrélation entre ces différents indicateurs c'est-à-dire que la valeur de l'un est affectée par une ou plusieurs valeur(s) de l'autre.

Par conséquent, l'évaluation de la qualité des sols consiste à mesurer les indicateurs appropriés et ensuite à les comparer avec les valeurs désirées ou valeurs seuils/critiques¹ et ceci à des intervalles de temps différents (Arshad et Martin, 2002).

La surveillance de la qualité des sols s'annonce indispensable pour pouvoir prévenir et corriger la dégradation au bon moment. Une qualité moins bonne d'un sol compromet sa capacité à effectuer de multiples fonctions ce qui engendre des coûts supplémentaires pour les agriculteurs et pour la société et de sérieuses menaces pour la durabilité de l'activité agricole ainsi que sur l'environnement.

II. Les phénomènes de dégradation des sols en Europe

Environ 9% de la superficie de l'Union Européenne (UE) sont couverts par des routes ou par du béton ; ce qui perturbe les gaz, l'eau et les flux d'énergie. Ceci conduit à une perte des terres fertiles (EC, 2007).

1. Le constat

Les conséquences des activités inadéquates sur le sol sont nombreuses à savoir la perte du carbone et de la biodiversité, la diminution de la capacité de rétention de l'eau, la perturbation des cycles de gaz et des éléments nutritifs, la diminution de la dégradation des contaminants ce qui entraîne la perte de la fertilité des sols en plus de l'altération de la santé publique et la menace de la sécurité alimentaire.

En effet, plusieurs travaux (UE, 2006 ; Arshad et Martin, 2002 et Ghali, 2007) ont mis l'accent sur les points suivants :

- la chute des superficies agricoles au cours des dernières décennies ;
- le déclin significatif de la qualité des sols à travers le monde dû aux changements dans les propriétés physiques, chimiques et biologiques ainsi qu'à la contamination ;
- le recul de la production mondiale dû à des sols inadéquats ou à une mauvaise gestion de l'eau ;
- la dégradation des sols en Europe est une réalité observée avec une incidence économique importante sur les terres agricoles ;
- la prise en compte de la dégradation de la qualité des sols dans la politique agro environnementale de l'UE n'est pas proportionnelle à l'ampleur du problème ;
- la dégradation des sols en Europe va se poursuivre, peut être à un rythme plus rapide.

2. Les processus de dégradation des sols en Europe

L'agriculture s'annonce comme l'une des activités les plus affectées par les conséquences de la détérioration des ressources naturelles et surtout la détérioration des sols. D'ailleurs, entre 2003 et 2007, le tiers des terres cultivables du monde était perdu à un rythme de plus de 10 millions d'hectares par an...

¹ la valeur critique est la gamme de valeurs d'un indicateur de sol donné qui doit être conservée pour un fonctionnement normal de la santé du sol. La détermination des valeurs critiques est une tâche difficile (travaux d'Arshad et Martin, 2002)

A partir de l'année 2006, on a assisté à la communication de la Commission Européenne concernant l'adoption d'une stratégie thématique pour la conservation des sols. Cette stratégie a mis le point sur les différents processus de dégradation qui peuvent affecter les sols européens et qui sont les suivants :

- l'érosion ;
- le déclin de la teneur en matière organique ;
- la salinisation ;
- le compactage ;
- le glissement des terres ;
- la contamination ;
- le déclin de la biodiversité ;
- l'imperméabilisation.

La naissance de ces différents processus était le résultat de l'engagement des différents acteurs dans une agriculture productiviste intensive et exploratrice des ressources naturelles. Les dégâts environnementaux occasionnés par les différentes activités productives créent des limitations dans l'utilisation des ressources naturelles susceptibles de freiner ou bloquer la croissance économique (Ghali, 2007).

A. L'érosion

C'est une action par laquelle divers éléments constituant les horizons superficiels de la couverture pédologique sont enlevés par le vent, la pluie, les rivières, les glaciers. Les facteurs principaux de l'érosion sont : la végétation, la couverture pédologique, la teneur en matière organique et les impacts de l'utilisation des sols par l'homme.

C'est un processus à trois étapes :

- 1- Détachement des particules de la surface du sol,
- 2- Mouvement de ces particules détachées par le vent ou le courant,
- 3- Dépôt des particules détachées,

Les deux types d'érosion qui menacent la qualité des sols sont l'érosion hydrique et celle éolienne. L'érosion s'accompagne de différentes nuisances, de gravité variable mais toujours contraignantes pour l'agriculteur. Elle est à l'origine d'un changement dans les propriétés des sols (profondeur, carbone organique, éléments nutritifs, texture et structure du sol). L'occurrence de l'érosion est souvent le résultat de l'intensification de la culture, de l'augmentation des labours, de la mauvaise gestion des eaux de surface etc.

B. Le déclin de la teneur en matière organique du sol

La matière organique du sol assure de nombreuses fonctions agronomiques et environnementales. Elle joue un rôle de tampon vis-à-vis des autres milieux (biosphère, eaux, sous-sol) et participe au cycle des gaz à effet de serre. Elle améliore la fertilité, l'aération, la réserve en eau et la biodiversité du sol. Elle limite la compaction et l'érosion hydrique et favorise le piégeage des métaux toxiques ou des micropolluants organiques. Elle provient de la transformation des débris végétaux par les organismes vivants, essentiellement les micro-organismes. Composée de 58 % de carbone organique en moyenne dont la quantité stockée dans les 30 premiers cm du sol est estimée à 700 gigatonnes au niveau mondial, elle libère du dioxyde de carbone (CO_2) et des composés organiques en se décomposant sous l'influence du climat et des conditions ambiantes du sol (MEDDM, 2010). Elle sert de source d'énergie pour la flore et la faune du sol, elle a un impact direct sur la structure et sur la stabilité structurale et contribue à l'alimentation des végétaux par la libération d'éléments nutritifs. Ainsi, la matière organique joue un rôle primordial dans le sol.

Il est notable que le déclin de la teneur en MOS est un processus assez avancé en Europe. D'ailleurs, 90% des sols européens ont déjà noté une teneur faible à moyenne en carbone organique. Le déclin de la MOS

est dû au recours fréquent au labour, à l'enlèvement/ au brûlage de la paille et des résidus, à une rotation de culture inappropriée etc.

C. La salinisation

La salinisation est l'accumulation des sels dans les sols. Elle peut être d'origine naturelle comme l'altération des roches, comme elle peut être d'origine humaine telle que l'irrigation, l'application excessive et inappropriée des fertilisants, l'intensification de la production végétale. La salinisation entraîne une augmentation de la pression osmotique et une toxicité pour les végétaux ainsi que la dégradation des sols.

D. La compaction

Les sols compactés/ tassés sont des sols qui ont vu leur densité apparente augmenter et leur porosité totale diminuer. Le tassement se produit quand les sols sont soumis à une pression mécanique importante (utilisation de machines lourdes, surpâturage etc.). Selon l'AEE, les superficies affectées par les phénomènes de tassement du sol seraient en augmentation ces dernières années. En effet, 32% du territoire européen sont occupés par des sols extrêmement sensibles à la compaction (Brahya et Loyen). Ainsi, la compaction peut aggraver la dégradation de la qualité des sols.

E. Le glissement des terres

Le glissement est dû à un mouvement du sol et une déstabilisation de sa structure et de ses propriétés ce qui entraîne une perturbation de la qualité des terres agricoles.

F. La contamination par les polluants

La contamination des sols a plusieurs sources : elle peut être due à l'industrie minière, à la métallurgie, aux rejets accidentels ainsi qu'à l'activité agricole. En effet, les polluants se concentrent autour des métaux lourds et des substances organiques telles que les pesticides et les solvants. La contamination des sols entraîne une perte de leur utilisation ainsi que la contamination de la nappe phréatique (Lefebvre).

G. Le déclin de la biodiversité

Le sol est un milieu vivant comprenant des microorganismes et de la faune. L'abondance, la diversité et l'activité des organismes que l'on y trouve sont des facteurs de sa qualité. Tous ces organismes jouent un rôle primordial dans la formation des sols et leur évolution. Ils remplissent également des fonctions environnementales essentielles (MEEDDM, 2010). Les microorganismes du sol participent à la fragmentation et à l'enfouissement ainsi qu'à la décomposition de la matière organique. Ils contribuent également à l'amélioration de la structure et à la stabilité des sols en favorisant la circulation de l'eau et la résistance à l'érosion. Ainsi le déclin de la biodiversité contribue à l'amplification du problème de la qualité des sols.

H. L'imperméabilisation des sols

L'imperméabilisation est causée par la couverture des sols pour réaliser des bâtiments et des routes ou effectuer d'autres opérations d'aménagement foncier. Ce genre de processus réduit l'infiltration et l'épuration des eaux de pluie ainsi qu'il limite la recharge des nappes phréatiques, ce qui se répercute négativement sur la qualité des sols (Brahya et Loyen).

L'occurrence de ces processus en plus des divers problèmes de l'environnement menace la durabilité de l'utilisation des sols européens. En effet, le déclin de la matière organique du sol et l'érosion sont parmi les processus les plus fréquents et les plus représentatifs de la détérioration de la qualité des sols. Ils témoignent des deux types de dégradation à savoir : la dégradation réversible et la dégradation irréversible.

Le premier type de dégradation est considéré comme un processus dont les conséquences peuvent être restaurées au fil du temps : c'est le cas de l'épuisement de la matière organique et de l'appauvrissement en éléments nutritifs. Le second type de dégradation fait appel aux processus de dégradation dont les conséquences sont difficiles voir impossible à restaurer au fil du temps : c'est le cas de l'épuisement de la profondeur du sol dû généralement à l'érosion hydrique ou éolienne, puisque le taux de régénération du sol est largement inférieur au taux de perte du sol par érosion (Hopkins *et al.*, 2001)

Plusieurs travaux (Hopkins *et al.*, 2001 ; CE.,2009) ont mis l'accent sur le fait que les processus de dégradation des sols sont étroitement liés à l'agriculture. Ils ont des impacts à la fois *sur site* et *hors site*. Les effets sur site portent généralement sur la diminution des rendements et la détérioration du sol au niveau d'une exploitation agricole ; ils sont donc observés sur les productivités et les revenus de l'exploitation. Les effets hors site se concentrent autour de la qualité de l'eau, et de la sécurité alimentaire (c'est une sorte d'externalité négative causée par l'exploitant). Il importe de signaler à ce niveau que les coûts de dégradation dus aux différents processus sont assez élevés, estimés à 38 milliards d'euros (UE, 2006).

Le degré de risque de dégradation de la qualité des sols est établi en fonction de la fréquence des processus précédemment cités. Par exemple, l'occurrence de l'érosion hydrique est fonction des précipitations, de la topographie, de la teneur en matière organique et des pratiques agricoles inappropriées. Donc, il existe une sorte de corrélation entre les divers processus de dégradation des sols (exemple : érosion et déclin de la matière organique).

Les processus de dégradation des sols sont des phénomènes naturels. Toutefois, les pratiques inappropriées ne peuvent qu'aggraver le potentiel de dégradation des terres agricoles. En effet, ce genre de pratiques et leurs impacts sur les terres agricoles sont orientés par plusieurs facteurs :

- des facteurs économiques : les prix des produits agricoles, le prix de l'énergie, le prix de la main-d'œuvre, les subventions, les taxes... ;
- des facteurs socioculturels ;
- des facteurs technologiques.

La dégradation de la qualité du sol présente un obstacle pour le développement durable et il semble que le monde devient de plus en plus conscient de l'ampleur de ce problème. Il est donc indispensable de trouver une solution pour atténuer les processus de dégradation et entretenir la qualité des sols.

III. Les instruments de protection des sols

Sur la base des parties précédentes, on peut affirmer que le sol est une ressource cruciale et très complexe. La dégradation de la qualité des sols européens est une réalité observée dans la plupart des régions et à des niveaux différents. En se rendant compte de l'ampleur du problème, les preneurs de décision se trouvent dans la nécessité d'agir afin de favoriser l'adoption de pratiques basées sur la durabilité des sols.

1. La politique américaine

Durant les années trente, la région des grandes plaines aux Etats-Unis a connu une série de tempêtes connue sous le nom « *Dust Bowl* » qui a endommagé plus de 20 millions d'hectares de terre et qui a dépouillé les champs. La région a été marquée par une érosion phénoménale qui emportait des millions de tonnes de terre par an. La gravité des effets de ces tempêtes a été renforcée par les pratiques inadéquates des agriculteurs surtout celles concernant l'utilisation abusive du labour.

Pour lutter contre la dégradation des sols, les Américains ont commencé par créer le « *Soil Conservation Service* » en 1935 (appelé aujourd'hui « *Natural Resources Conservation Service* ») ainsi que par la diffusion de nouvelles techniques de conservation du sol telles que la culture en courbe de niveau et la culture alternée. De plus, cette politique s'est préoccupée de fournir aux exploitants agricoles les

renseignements et aussi les moyens financiers nécessaires afin de leur permettre de mieux valoriser leurs terres (Morel, 1953).

Ainsi, la conservation des sols a figuré parmi les objectifs des premières législations agricoles américaines et ce dans le but de minimiser le risque de dégradation du potentiel productif des grandes cultures. Dans le cadre de l'éco-conditionnalité, trois programmes visant la conservation des sols ont été définis dans le *Farm Bill* de 1985 : la « *conservation compliance* », le « *sodbuster* » et le « *swampbuster* » (Féret, 2002).

Etant donné qu'elle a permis de réduire la significativité de l'érosion et d'augmenter les rendements des principaux produits agricoles notamment les céréales, nous pouvons juger que la politique américaine en matière de protection des sols est assez efficace.

2. La politique européenne

La protection du sol est essentielle pour assurer la pérennité de l'activité agricole. En effet, la prise en compte de l'importance de protéger réellement le sol s'est produite à Rio en 1992 mais l'Europe a traîné avant de considérer le rôle capital de la protection des sols qui a été instaurée dans la réforme de la Politique Agricole Commune (PAC) de juin 2003 sous forme d'éco-conditionnalité qui suggère le conditionnement de l'attribution des aides par le respect de certaines conditions ; il s'agit d'une mesure introduite dans le cadre de l'Agenda 2000 dans le but de conditionner les aides au respect des « bonnes pratiques agricoles et environnementales » telles que :

- l'entretien des sols ;
- la protection contre l'érosion ;
- la conservation et/ou l'amélioration de la matière organique du sol ;
- la garantie d'une bonne structure du sol.

Avec des normes plus élevées et un niveau de responsabilité supérieur en matière de qualité des sols, le problème de l'exploitant sera d'effectuer volontairement le choix approprié qui conserve et améliore le sol. Par l'instauration de l'éco-conditionnalité, il semblerait que les agriculteurs aient pris conscience du problème de conservation des sols suite à ces nouvelles exigences. En parallèle, les agronomes ne cessent d'insister sur le rôle capital que jouent l'information et le conseil dans la réussite d'un tel objectif. En effet, une bonne conservation du sol peut avoir des avantages qu'un exploitant individuel ne prévoit pas mais qui ont de vraies implications sur l'environnement à l'échelle mondiale.

En examinant l'environnement réglementaire et les instruments de politique s'adressant à la question de dégradation des sols, on remarque que la protection de ces derniers n'est pas un objectif spécifique : la communication de la commission européenne du 16/04/2002 affirme qu'il n'existait aucune politique européenne explicite luttant contre la dégradation des sols. Il s'agit plutôt d'un objectif secondaire introduit dans la législation (Code rural, Code forestier (France)) ainsi que dans la politique environnementale. Il est notable que les activités menées dans le cadre des autres politiques (agricole, environnementale, régionale...) ont une influence sur la protection des sols.

Etant donné que la protection de l'environnement en général est primordiale dans le comportement social des agents et dans les décisions politiques en vue d'assurer un développement économique et social durable, le problème environnemental va au-delà des frontières nationales et régionales et ne peut être résolu que par des actions concertées au niveau européen et international (CE, 2006).

D'après l'OCDE, il existe différents programmes destinés à faire face aux problèmes environnementaux se posant dans l'agriculture notamment la dégradation des sols en ayant recours à une gamme de mesures à savoir :

- les mesures incitatives : instruments économiques du genre paiements, taxes, redevances, droits négociables... ;

- les mesures de règlement : instruments de maîtrise et de contrôle, dispositions réglementaires, mécanismes d'éco-conditionnalité ;
- les mesures de soutien : conseil et soutien aux institutions.

Le principe d'éco-conditionnalité peut être considéré comme une mesure en faveur de la protection du sol puisque certaines mesures agro-environnementales convergent vers l'objectif de protection des sols (EC., 2007).

Même si on tire profit des mesures en vigueur, elles sont loin de couvrir tous les sols et toutes les menaces recensées : les aides ne sont pas proportionnées au risque de dégradation. A titre d'exemple, les maraîchers ne reçoivent pas d'aides alors qu'ils sont soumis à plus de pression érosive que les autres cultures. Ainsi même en présence de ces mesures, la dégradation des sols ne peut que continuer en absence d'une politique qui lui est destinée.

En 2006, on a assisté au développement d'une stratégie thématique de protection du sol proprement dite dont l'objectif central est de garantir une utilisation durable des sols moyennant :

- la prévention de la dégradation ultérieure des sols et la préservation de leurs fonctions ;
- la restauration des sols dégradés de manière à les ramener à un niveau de fonctionnalité correspondant au moins à leur utilisation actuelle et à leur utilisation prévue en tenant compte également des implications financières d'une telle tâche.

Cette stratégie proposée est organisée en quatre piliers :

- établir une législation cadre visant la protection et l'utilisation durable des sols ;
- intégrer la protection des sols dans la formulation et la mise en œuvre des politiques nationales et communautaires ;
- augmenter la sensibilité du public quant à la nécessité de protéger les sols.
- combler le manque de connaissance actuellement perceptible dans certains domaines de la protection des sols. (SEC 200-620).

Plusieurs Etats membres considèrent les sols comme des sujets à controverse, le processus d'élaboration de cette stratégie s'est arrêté. Jusqu'à ce jour, le sol ne bénéficie pas de la même protection que les autres compartiments vitaux de l'environnement, tels que l'eau et l'air (AEE, 2010).

Dans un essai de comparaison entre l'expérience américaine et celle européenne en matière de conservation des sols, on peut affirmer que la politique américaine est moins souple mais en contre partie plus normative et efficace que celle appliquée dans le cadre de la politique agricole commune (PAC) de l'Union Européenne.

IV. Conclusion

Certes, l'agriculture intensive en plus de la dissociation de la production animale et végétale a des répercussions néfastes sur les sols dans les différents coins du monde. D'ailleurs, les agriculteurs avec l'intention de s'investir dans la conservation de la qualité des sols sont confrontés à l'inter-temporalité des décisions d'allocation des ressources et doivent tenir compte non seulement des avantages actuels mais également des coûts et des avantages futurs liés à l'investissement.

Même si la dégradation des sols notamment l'érosion est une réalité observée et représente un obstacle pour l'utilisation durable des terres agricoles, les effets d'une telle observation ne sont toujours pas enregistrés sur les productivités ou les revenus générés par les sols européens. Ce constat nous ramène à affirmer qu'il existe de fortes raisons qui poussent les agriculteurs à ignorer l'importance d'entretenir la qualité de leurs sols :

H₁ : il existe des variables qui masquent la dégradation des sols et maintiennent un niveau stable des productivités des sols. Parmi ces variables, on trouve :

- les engrais chimiques qui ont une productivité marginale décroissante ;
- les progrès génétiques qui permettent de produire des variétés fortement productives et tolérables aux conditions défavorables au niveau des sols ;
- les gaz à effet de serre formés en grande majorité par le CO₂ et dont la concentration dans l'air ne cesse d'augmenter ce qui fait que la plante aura moins de difficulté à aspirer le carbone.

Tous ces facteurs sont susceptibles de réduire la significativité économique de la dégradation des sols à court terme.

H₂ : l'aversion au risque et la préférence pour le présent généralement montrées par les agriculteurs conduisent à limiter la probabilité de s'intéresser à l'entretien de la qualité des sols.

H₃ : le sol est un capital foncier à double dimension : une dimension quantitative et une dimension qualitative. A ce niveau, la transition démographique en Europe peut jouer un rôle important : comme les anciens agriculteurs sont partis à la retraite, les agriculteurs restants se sont mis à acheter plus de terres agricoles et à moins entretenir la qualité de leurs sols. De plus, le sol est un capital privé qui est entretenu par son propriétaire. Etant donné que les terres constructibles coûtent beaucoup plus cher que les terres agricoles, les agents économiques accordent plus d'attention à la quantité de la terre qu'à sa qualité.

H₄ : les mesures incitatives distordent les vrais coûts et bénéfices de la conservation des sols ainsi qu'elles affectent la perception du niveau optimal de conservation du sol. Donc, une incitation par les prix peut affecter l'aptitude des agriculteurs à s'investir dans la conservation.

Toutes ces hypothèses conduisent à ignorer l'ampleur du problème de la dégradation de la qualité des sols, au moins à court terme.

Ainsi, les décisions des agriculteurs concernant les pratiques à adopter pour lutter contre la dégradation des sols sont influencées par une variété de facteurs qui font que la détérioration de cette qualité de sol demeure ignorée :

- des facteurs sociaux : l'âge, l'éducation, la perception, l'héritage...
- des facteurs techniques : le type d'utilisation, le climat ;
- des facteurs institutionnels : la PAC ;
- la technologie ;
- les prix du marché.

Bien entendu, ceci ne permet pas de dire que les agriculteurs ignorent parfaitement la dégradation de la qualité des sols. D'ailleurs, on a pu assister à la migration de plusieurs systèmes agricoles à adopter des pratiques plus respectueuses de la qualité des sols et qui s'annoncent assez prometteuses. Parmi ces pratiques, on peut citer :

- l'agriculture biologique : elle a un effet positif sur la teneur en matière organique, sur la biodiversité des sols et sur la qualité de l'eau ainsi qu'elle permet d'économiser sur différents coûts tels que le coût d'énergie, le coût d'utilisation des pesticides, le coût de la main-d'œuvre ;
- l'agriculture de conservation : c'est une pratique basée sur le non labour ou le labour réduit, la couverture permanente et la rotation des cultures. Elle contribue à minimiser le risque de dégradation par l'augmentation du stock de carbone organique, l'amélioration de l'activité biologique en plus de la fertilité et l'augmentation de la capacité de rétention de l'eau. Bien qu'elle nécessite un investissement important, elle permet de réduire l'érosion du sol et améliorer la résistance au tassement ainsi que d'économiser sur plusieurs coûts (FAO, 2003).

Ce genre de pratiques exige la formation des agriculteurs et l'adaptation aux circonstances locales avant l'obtention d'un profit économique confortable.

En outre, ce premier chapitre nous a permis de vérifier que le sol est un milieu actif et complexe présentant des mutations en termes de propriétés physiques, chimiques et biologiques. Ainsi, le suivi et la bonne gestion de la dégradation du sol n'est pas une tâche facile à réaliser. L'atténuation de la dégradation du sol se fait souvent dans un cadre dynamique. D'ailleurs, la revue de la littérature (La France, 1991 ; Clarke, 1991 ; Goetz, 1997 ; Mc Connel, 1983 ; Grepperud, 1997 ; Van Vuuren, 1985) nous a montré que ce genre de problèmes est souvent analysé par des modèles de contrôle optimal puisqu'il s'agit d'un processus dynamique impliquant des compromis inter temporels. Aussi simples qu'ils étaient, l'application de ces modèles sur le terrain s'est avérée assez difficile et il a fallu mettre en place plusieurs hypothèses pour arriver à trouver des résultats ambitieux.

Dans ce qui suit, on s'intéressera à étudier les pistes d'études qui permettent de mieux comprendre les problèmes de dégradation des sols et de mettre le point sur les outils permettant de mieux aborder ce genre de problèmes. On essayera donc de répondre aux questions suivantes :

- comment devrait-on considérer la ressource sol ?
- la dégradation du sol est-elle une fonction jointe de l'activité agricole ?
- par où commencer pour étudier la dégradation du sol ?
- quelles sont les méthodes appropriées pour la résolution des problèmes de gestion des ressources naturelles ?

Chapitre II

Traitement des problèmes de gestion des ressources naturelles : le cas du sol

I. Le sol : ressource renouvelable ou non renouvelable ?

La nature de la ressource sol diffère selon les auteurs, ce qui prouve que la considération de la nature de cette dernière varie selon les disciplines : Barbier (1995) considère le sol comme une ressource semi-renouvelable alors que Breeke (1999) le voit plutôt comme une ressource renouvelable lorsque la source de sa dégradation est réversible c'est-à-dire lorsqu'on peut remédier à l'épuisement de la terre par l'addition des fertilisants organiques et inorganiques (cité par Tizale C.Y., 2007). En considérant les dégâts irréversibles qui peuvent toucher le sol, il est possible de concevoir le sol comme une ressource lentement ou non renouvelable sur une période de temps raisonnable. Selon l'AEE (2002), le sol est une ressource non renouvelable sur une échelle de 50 à 100 ans (citée par Ghali M., 2007). Ainsi, si on considère que le sol est une ressource non renouvelable ou à la limite lentement renouvelable, une grande attention devrait être accordée à sa protection, ce qui renvoie à l'importance de l'entretien de la fertilité des terres agricoles et de leur maintien en bonne qualité.

II. La dégradation de la qualité du sol comme production jointe de l'activité agricole

Pour traiter les questions environnementales, tel est le cas de la dégradation des sols, on a pris l'habitude d'en étudier les causes et les conséquences sur le long terme. Une branche de l'économie qui traite aussi des questions sur le long terme est la théorie du capital. C'est une théorie qui examine les conditions technologiques pour l'industrialisation des moyens de production, suivie par une analyse des effets économiques. Généralement, il existe une sorte de tension entre la théorie du capital et la préoccupation environnementale : en effet, dans la théorie du capital, l'augmentation de l'horizon de planification est socialement bénéfique puisqu'elle permet une croissance du taux d'accumulation de capital plus rapide avec une augmentation des possibilités de consommation sur le long terme. Le problème se trouve dans le fait qu'une croissance économique plus rapide peut conduire à un appauvrissement plus intense des ressources naturelles et une production importante de polluants. Donc, l'augmentation de l'horizon de planification pour les décisions économiques conduit à des conséquences dangereuses surtout lorsque les effets de ces décisions sur l'environnement sont ignorés pendant le processus de décision. Ainsi, il faut chercher à réunir les décisions à long terme sur l'économie et l'environnement dans un cadre unifié de modélisation dynamique (Baumgärtner, 2002).

A ce niveau, il importe de signaler les divergences entre l'économie écologique et l'économie de *mainstream* : dans l'idée de rapprocher les sciences du vivant des sciences sociales, l'économie écologique a émergé à partir de la conviction du fait qu'il existe un manque d'interdisciplinarité entre l'économie néoclassique et l'économie énergétique et que les démarches qui confrontent l'économie à l'écologie mènent souvent à des impasses. L'économie écologique a été reconnue pendant les années 80, l'idée principale porte sur une insatisfaction éprouvée envers la réduction de la question environnementale à la théorie d'internalisation des effets externes négatifs et envers la substituabilité illimitée des ressources naturelles ou des aménités environnementales par des ressources humaines ou par du capital cumulé (Ghali, 2007). En ce qui concerne le « *mainstream* » ou courant dominant, il s'agit d'un terme utilisé pour distinguer l'économie en général des approches et des écoles hétérodoxes en économie. Il part du postulat qui dit que les ressources sont rares et qu'il est nécessaire de choisir entre des alternatives concurrentes. Cette orientation repose sur l'économie néoclassique tout en reconnaissant l'existence d'imperfections dans le marché.

Selon Baumgärtner, il est nécessaire de considérer deux types de capitaux : les biens (le produit) et les mauvais biens (les polluants). Dans notre étude, on pourra considérer la production d'un produit agricole comme un bien et la dégradation de la qualité du sol comme un mauvais bien. On est donc dans l'obligation de considérer la dynamique des interactions économie-environnement, une dynamique caractérisée par l'existence de deux délais inter temporels indifférents et indépendants pour les deux sous systèmes suivants :

- le sous système économique : la dynamique est déterminée par le taux de détérioration des capitaux ;

- le sous système écologique : la dynamique est déterminée par le taux de dégradation des polluants dans l'environnement.

D'un point de vue d'un économiste écologique, le processus de production est une transformation d'un certain nombre d'inputs en un certain nombre d'outputs, chacun de ces outputs est caractérisé par une masse et une entropie. Selon la loi de la thermodynamique, chaque processus de production donne naissance à plus qu'un output et génère obligatoirement une production jointe.

Ainsi, les produits joints sont nécessaires et inévitables. Pour que le processus de production soit réellement représenté, il doit tenir compte de la production jointe (Baumgätner, 2002). D'après Louhichi *et al* (2010), dans le contexte de modélisation des relations entre l'agriculture, l'environnement et les ressources naturelles, les externalités doivent être considérées en tant que produits joints.

Selon les économistes de l'environnement, la dégradation du sol est considérée comme une externalité négative liée à la production agricole et qui peut faire l'objet d'une analyse économique.

Dans le courant dominant, l'externalité est un coût ou un dommage imposé à autrui mais non pris en compte dans le calcul économique de celui qui le génère. Considérer l'externalité comme une production jointe signifie qu'il s'agit d'une conséquence d'un processus de production et nous ramène à une fatalité technologique potentiellement génératrice d'un coût. De ce point de vue, on pourra supposer qu'un processus de production d'un bien agricole donné (blé, maïs...) entraîne forcément la dégradation de la qualité du sol (une perte réversible de la teneur en matière organique et/ou une perte irréversible en profondeur du sol) comme externalité négative.

III. Estimation des fonctions de production

L'agriculture est une activité fortement corrélée avec l'environnement. En effet, un bon environnement favorise la production agricole mais l'inverse n'est pas juste. La production agricole génère souvent des effets néfastes sur l'environnement sous forme de produits joints. Pour arriver à atténuer au mieux ce genre d'externalités, il est indispensable de bien analyser l'étroite relation entre l'agriculture et l'environnement.

Personne ne peut nier le fait que la dégradation du sol est un problème environnemental causé par la production agricole. Elle continue à prendre place dans tous les coins du monde et ses effets ne cessent de s'aggraver en raison de l'intensification de l'agriculture conventionnelle et des catastrophes naturelles (inondations, épisodes de sécheresses, déclin de la biodiversité etc.). La quantification de cette production jointe n'est pas une tâche facile, sa variation dépend du processus de production, qui à son tour peut varier en fonction de différents facteurs sociaux, techniques, technologiques, institutionnels ou autres.

Dans le cas d'un exemple typique de l'économie des ressources naturelles comme celui de la pêche, on s'intéresse à optimiser l'utilisation de la ressource avec des coefficients économiques tout en tenant compte des facteurs biophysiques. En d'autres termes, on n'arrête pas de pêcher tant qu'on n'a pas atteint un certain seuil d'extraction. Par analogie à cet exemple, même si le sol est une ressource lentement renouvelable, il est indispensable de construire un outil d'aide à la décision pour pouvoir regarder la manière avec laquelle la qualité du sol se dégrade.

Devant un objectif de durabilité et comme la qualité du sol peut figurer parmi les biens collectifs, les décideurs publics sont dans l'obligation d'introduire les instruments de politique convenables qui permettront d'internaliser la dégradation de la qualité du sol.

L'efficacité des politiques de conservation des sols dépend fortement de la compréhension du processus de dégradation. Avec des instruments influents, il sera possible de garantir un niveau de bien-être satisfaisant pour l'agriculteur tout en tenant compte d'une contrainte dynamique, la qualité du sol. Une telle efficacité stipule une bonne estimation de la fonction de production.

1. La fonction de production d'ingénieur

Dans sa définition la plus classique, une fonction de production est censée présenter la corrélation entre les facteurs de production et les produits afin de tirer la relation entre les prix et les quantités utilisées

dans un état d'équilibre à long terme (Robinson, 1955) [cité par Boussard, 2011]. Il s'agit donc d'un concept à caractère technique dont le but est de déterminer les conséquences des techniques de production sur le système de prix ainsi que sur la relation offre – demande à court et à long terme. Ainsi, une détermination réaliste de la fonction de production passe par une description fiable des techniques de production, une tâche qui relève des compétences de l'ingénieur.

De ce point de vue, seuls les ingénieurs devraient être qualifiés pour définir des fonctions de productions, bien entendu sans négliger l'aide qui peut leur être fournie par les économistes pour faciliter l'utilisation des résultats dans des modèles économiques.

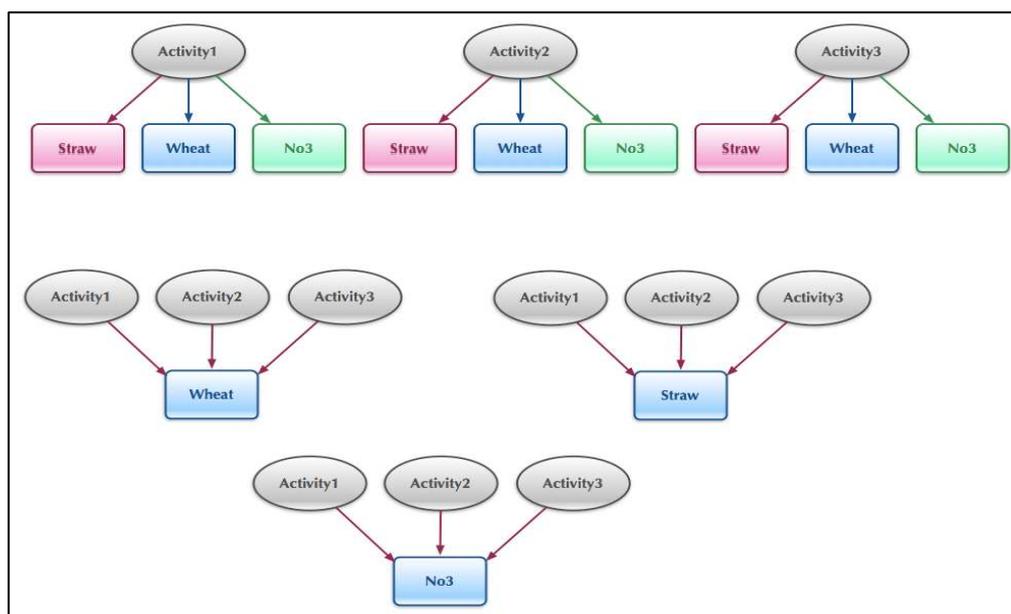
En effet, l'utilisation d'une fonction de production d'ingénieur permet de déterminer la quantité physique d'inputs nécessaires pour produire une unité d'output. Cette fonction se traduit par une représentation explicite de la technologie. C'est une approche permettant de basculer entre les processus de production qui constituent le lien essentiel entre les modèles biophysiques et les modèles économiques. Si on utilise ce genre de fonction, nous devons traiter simultanément le système biophysique et le système bioéconomique ainsi que quantifier les variables physiques (utilisation des engrais, dégradation du sol). Cette méthodologie présente l'avantage de ne pas bâtir ses résultats sur une extrapolation du passé, elle permet plutôt l'extrapolation des résultats dans le futur (Ghali, 2007). Cependant, la fonction de production d'ingénieur demande une forte information et nécessite des données physiques sous forme de matrice inputs – outputs.

2. Le raisonnement par activité de production

Il s'avère très intéressant de considérer l'activité de production et non pas le bien économique pour étudier la relation entre l'agriculture et l'environnement. C'est une approche dont l'élément basique est l'activité de production et non pas le produit. Par exemple, une unité de blé n'est pas l'élément basique mais c'est plutôt le processus de production qui permet d'obtenir cette unité qui est l'élément basique. Ainsi on se permet de dire que chaque produit peut être construit par plusieurs activités et que chaque activité peut produire plusieurs produits (Flichman et al, 2008).

Dans notre étude, la fonction de production (rendement) ainsi que la fonction d'externalité (dégradation de la qualité du sol) correspondent à une relation établie entre les facteurs et pratiques culturales utilisés dans la production agricole (travail du sol, irrigation, fertilisation,...). On peut schématiser ces fonctions de la façon suivante :

Figure 2 : Le Raisonnement par activité de production



Source : Flichman et al. (2008)

- **Production (Rdt) = f (Xi) avec Xi : quantité d'inputs i, i= {1,2, ..., n}**
- **Externalité = f' (Xi) avec Xi : quantité d'input**

Dans le cadre de notre travail, nous soutenons l'idée de considérer l'approche par activité de production pour mieux estimer la fonction de dégradation de la qualité du sol. Cette méthode nous conduit à mieux évaluer l'efficacité des mesures environnementales visant la conservation des sols ainsi que d'étudier leurs impacts économiques sur différentes échelles.

IV. Importance du caractère dynamique de la qualité du sol

Avec l'émergence de la notion de durabilité à la surface de tous les discours politiques, plusieurs travaux de recherche ont été lancés depuis la fin des années 80 et jusqu'à présent afin de quantifier l'effet de la prise en considération de la qualité des sols sur la production et sur les revenus des exploitations agricoles. Bien entendu, ce genre de problèmes est soumis à plusieurs aléas et ne peut être traité que dans cadre dynamique. D'ailleurs, la plupart des travaux collectés ont recours à des modèles dynamiques de contrôle optimal pour maximiser la valeur actualisée des revenus des exploitants sous une contrainte représentant la qualité du sol et qui doit être respectée sur un horizon de planification déterminé. Pas mal de ces travaux initiés par Mc Connel (1983) et notamment celui de Grepperud (1997) n'ont pas pu aboutir à une conclusion concrète sur l'effet de la production agricole sur la dégradation du sol. Ils se sont généralement arrêtés à dire qu'à l'échelle d'une exploitation agricole, cet effet peut aller dans tous les sens. Ce constat prouve que la dégradation de la qualité du sol est un processus dynamique impliquant des compromis inter temporels. Le choix de la meilleure méthode permettant d'aboutir à des résultats pertinents s'annonce assez difficile.

Avant de travailler sur des modèles économiques, il sera intéressant de regarder les modèles biophysiques qui permettent à l'économiste de construire la fonction de production d'ingénieur (Louhichi, 1997) [cité par Ghali, 2007]. Les modèles biophysiques les plus connus qui pourraient simuler les indicateurs de qualité du sol tels que l'érosion et la teneur en matière organique tout en tenant compte de leur caractère dynamique sont EPIC, CROPSYST et APES. Donc, quel que soit le modèle économique retenu dans le

cadre de cette étude, les données qui seront utilisées tiendront compte de la complexité de représentation du problème de dégradation de la qualité du sol.

V. Les méthodes de résolution des problèmes de gestion des ressources naturelles

Pendant une longue période, l'analyse économique en agriculture était statique. Actuellement, il devient de plus en plus curieux de voir à quel point l'utilisation actuelle des ressources naturelles, souvent conçues comme un stock de capital, pourrait limiter son utilisation future.

Dans leur définition la plus générale, les modèles dynamiques sont ceux qui représentent explicitement le temps. Le recours à ce genre de modèles nous offre la possibilité d'analyser les conséquences de certaines décisions sur plusieurs périodes futures. En effet, il existe deux grandes catégories de modèles dynamiques à savoir les modèles d'optimisation inter temporelle et les modèles récursifs. Dans ce qui suit, voici une brève présentation de ces modèles.

1. Les modèles dynamiques d'optimisation inter temporelle

Dans cette catégorie, le modèle tient compte de toutes les périodes comprises dans l'horizon de planification. On sépare entre deux types de représentation des modèles d'optimisation inter temporelle.

A. Les modèles déterministes

Ce sont des modèles qui contiennent une information parfaite et complète dans le futur, où tous les paramètres sont supposés connus par le décideur.

B. Les modèles stochastiques

a] Les modèles stochastiques à une seule décision

Ce sont des modèles contenant une connaissance sur le futur en termes de profitabilité des états de la nature et qui optimisent une fonction d'utilité. Ici, l'incertitude se concentre autour de la disponibilité des contraintes et/ou des coefficients de la fonction objectif.

b] Les modèles stochastiques à plusieurs décisions séquentielles

Dans ces modèles, l'information disponible pour le modèle est introduite par étape, ce qui permet de prendre des décisions progressives et par conséquent d'améliorer la qualité des résultats.

2. Les modèles récursifs

Les modèles récursifs sont aussi des modèles dynamiques. La différence essentielle avec les modèles d'optimisation inter temporelle se situe dans le fait qu'au lieu d'optimiser sur tout l'horizon de planification, le modèle optimise chaque étape à part. Ainsi, dans un modèle récursif, les résultats d'un pas de temps t vont influencer les résultats du pas de temps suivant $t+1$.

Après avoir étudié ces différentes classes de modèles et ce sur la base du travail de Blanco *et al* (2011), nous pouvons délimiter deux grandes familles de méthodes d'optimisation : l'optimisation dynamique non séquentielle et l'optimisation dynamique séquentielle.

3. L'optimisation dynamique non séquentielle

Cette méthode renferme les modèles déterministes et les modèles stochastiques à une seule étape de décision. Avec cette méthode, les décisions optimales sont déterminées au début du processus de décision et on ne peut plus les modifier. Selon Wilen (1985) [cité par Blanco *et al*, 2011], les ressources naturelles sont mieux valorisées en tant que stock de capital qui fournit un flux de services. Donc, le problème

d'allocation des ressources naturelles consiste en la maximisation des bénéfices obtenus de l'utilisation du flux des ressources au fil du temps, tout en tenant compte du fait que l'utilisation actuelle de ces ressources peut influencer leur disponibilité future. Par conséquent, la théorie du contrôle optimal s'annonce l'approche la plus appropriée pour gérer au mieux les ressources naturelles. Le problème peut être résolu par la programmation dynamique ou par la programmation mathématique.

4. L'optimisation dynamique séquentielle

Lorsque chaque étape de décision ne dépend pas seulement de l'état du système et des décisions prises mais aussi de variables aléatoires que le décideur ne peut pas contrôler, le problème devient stochastique. Généralement, un problème de décision stochastique séquentielle peut être représenté sous forme d'un arbre de décision. Il peut être résolu par la programmation stochastique dynamique ainsi que par la programmation stochastique discrète ou par la programmation stochastique récursive.

A. La programmation stochastique dynamique

Cette méthode permet de diviser le problème d'optimisation inter temporelle en T stades individuels. Ensuite le problème consiste à résoudre une relation récursive. Cette relation permet la résolution du problème en commençant par le dernier stade et en revenant stade par stade jusqu'au stade initial (comme dans le cas d'un modèle déterministe). L'avantage de cette programmation se trouve dans le fait qu'elle permet de traiter des processus déterministes et aléatoires simultanément.

B. La programmation stochastique discrète

Cette méthode est utilisée pour élaborer des prises de décision séquentielles dans un temps discret avec un horizon de planification fini et lorsque les variables de contrôle et les variables d'états sont continues. Les équations sont résolues simultanément par l'utilisation d'un algorithme mathématique.

C. La programmation stochastique récursive

C'est une nouvelle méthode qui suppose que le décideur est plus aveugle que le programme dynamique. Elle se différencie des autres méthodes par la manière avec laquelle l'information entre dans le problème. Ainsi, le problème consiste en la résolution d'un problème dynamique par la construction d'une série d'optimisations séquentielles. C'est donc une méthode permettant l'introduction de changements exogènes en plus de la disponibilité stochastique de la ressource.

VI. Synthèse

Le sol reste peu étudié par les économistes de l'environnement et des ressources naturelles (Timothée, 2009). Durant les dernières décennies, on a significativement amélioré la compréhension de la dynamique des sols. Cependant, on s'est rendu compte que la dégradation de la qualité du sol demeure l'un des processus les plus complexes et les plus difficiles à gérer.

Ce constat découle du fait que selon l'angle sous lequel nous étudions le problème de dégradation du sol, sa compréhension et son analyse diffèrent. Dans notre étude, nous considérons que la dégradation du sol est une production jointe de l'activité agricole et nous insistons sur l'idée qui stipule que la dégradation du sol dépend en grande partie du processus de production utilisé et non pas seulement de la nature du produit cultivé. Ainsi, la gestion optimale de cette ressource lentement renouvelable passe par la bonne compréhension du problème pour pouvoir arriver à représenter la contrainte qualité du sol d'une manière proche de la réalité.

Avant de passer à spécifier la fonction de production de la dégradation du sol et d'élaborer le modèle convenable pour évaluer l'effet des politiques en place sur la prise de décision de l'agriculteur concernant l'investissement sur la qualité du sol et sur la durabilité de l'utilisation des terres agricoles, nous devons faire le point sur les questions suivantes :

1. Quel indicateur de qualité du sol ?

Un sol de bonne qualité est forcément un sol fertile capable de générer une bonne production agricole. Mais la recrudescence des processus de dégradation agit sur la qualité du sol en question. Ces processus peuvent entraîner de graves pertes irréversibles du sol ainsi qu'une perturbation réversible de sa fertilité. Vu le rôle important que jouent la matière organique (indicateur d'une dégradation réversible) et la profondeur (indicateur d'une dégradation irréversible) dans le maintien des sols en bonne qualité, l'idéal est de construire un indice de qualité de sol intégrant ces deux indicateurs. Toutefois, nous savons que l'amélioration de la teneur en matière organique permet de réduire la vulnérabilité des sols au problème d'érosion et réciproquement, la lutte contre l'érosion permet de stabiliser cette teneur en MOS. Ainsi, nous pouvons nous contenter de retenir un seul indicateur de qualité de sol et ce selon le terrain étudié.

2. La dégradation de la qualité du sol : dynamique ou statique ?

Pour pouvoir répondre à cette question, il est indispensable de tenir compte des deux points suivants :

- l'aléa climatique : nous admettons qu'il n'a pas une influence significative sur le choix du processus de production. En effet, l'agriculteur a recours aux mêmes techniques de productions et aux mêmes activités éventuellement inadéquates pour la minimisation de la vulnérabilité du sol aux différents processus de dégradation. Ainsi, les aléas climatiques n'influencent pas directement les activités de production choisies par les agriculteurs ;
- l'horizon de planification : nous savons que la manifestation du processus de dégradation du sol notamment l'érosion est relativement lente. Par conséquent, il est difficile de constater l'effet de l'érosion au bout d'une ou deux années. Ainsi, le mieux est de choisir un horizon de planification de plus de 20 ans.

Du fait de la lenteur de la manifestation de la dégradation du sol, on peut dire que la dégradation de la qualité du sol représente un caractère qui n'est pas tout à fait dynamique mais n'est pas statique non plus, ce qui nous offre plus de liberté dans la spécification du modèle à utiliser.

3. La dégradation de la qualité du sol : stochastique ou déterministe ?

Il est vrai que lorsqu'on parle de la dégradation du sol en tant que produit joint de l'activité agricole, personne ne peut nier l'existence d'une forte corrélation avec plusieurs aléas climatiques, techniques ou autres. Ainsi, la prise de décision permettant de développer une activité de production agricole tout en assurant l'entretien et la maintenance de la qualité du sol peut dépendre d'une ou plusieurs variables aléatoires que le décideur ne peut pas contrôler. Ainsi, la stochasticité est relativement présente dans le problème de dégradation de la qualité du sol.

Si nous regardons le problème de dégradation sous un autre angle et pour simplifier sa représentation, il semble plausible que les aléas présents ne changent pas vraiment les décisions de rotations ou les activités de production des agriculteurs. Les dégâts pouvant être subis par le sol sont presque les mêmes en passant d'une campagne agricole à une autre. Ainsi, il semble qu'un modèle déterministe sur lequel on peut agir par l'instauration d'un certain risque pourra bien représenter le problème que stipule notre étude.

Chapitre III

Comportement économique face à une dégradation de la qualité des sols : le cas de l'érosion dans la région Midi-Pyrénées

Introduction

La recrudescence des problèmes de dégradation cités dans les sections précédentes (notamment l'érosion et le déclin de la teneur en matière organique) agit sur la quantité et sur la qualité des sols. Ce constat est susceptible d'entraîner des pertes dans la profondeur des sols en plus de perturber la fertilité et la productivité des terres agricoles. Il semble donc nécessaire de considérer le sol comme une ressource naturelle non renouvelable ou à la limite lentement renouvelable.

Comme il a été signalé auparavant, la grande majorité des recherches scientifiques ultérieures qui se sont intéressées à étudier les impacts de la dégradation du sol sur la production et sur le revenu des agriculteurs, a eu recours à la teneur en matière organique et à la profondeur du sol comme deux variables proxy représentant la qualité des sols. Toutefois, rares sont les travaux qui ont utilisé ces deux indicateurs dans un même modèle. Le plus souvent, on s'est intéressé à traiter le problème de dégradation irréversible en faisant appel à un indicateur comme la profondeur du sol.

Dans notre étude, on insiste sur la différenciation entre la fertilité et la qualité du sol qui sont largement confondus. On suppose la fertilité comme une composante de la qualité du sol, c'est-à-dire qu'un sol de bonne qualité est forcément fertile alors que le contraire n'est pas toujours juste : en effet, on peut avoir des sols de qualité médiocre auxquels on ajoute des fertilisants chimiques ou autres à un instant t , ça ne peut qu'améliorer la fertilité du sol et donc le revenu de l'agriculteur à court terme mais la qualité du sol peut devenir encore plus médiocre sur le long terme.

Un point assez décisif dans le maintien de la qualité des sols a été bien expliqué dans le rapport du projet « Soco » (*European Commission*, 2009) : c'est le fait que les processus de dégradation des sols ne sont pas toujours indépendants, du coup la corrélation entre ces processus peut sévèrement entraîner une accélération dans le déclin de la qualité des sols. L'érosion et le déclin des teneurs en matière organique sont des exemples typiques d'indicateurs de qualité de sol qui ont des répercussions plus ou moins directes sur pratiquement tous les autres processus de dégradation.

En effet, beaucoup de travaux (*European commission*, 2009 ; Barbier, 1998) insistent sur le rôle primordial que jouent la matière organique et la lutte contre l'érosion dans la protection, la conservation et l'amélioration de la qualité des sols dans les différents systèmes de cultures. D'après Reeves (1997), le maintien de la qualité des sols est essentiel pour assurer une productivité agricole et une qualité de l'environnement durable pour les générations futures. Selon le même auteur, le terme qualité de sol a connu beaucoup de mutations : comme les différents acteurs sont devenus plus conscients de l'importance de l'environnement, la définition de la qualité du sol a pris une extension d'un terme associé au potentiel productif du sol à un terme considérant que le sol agit comme un tampon de l'environnement, protégeant ainsi les eaux souterraines des produits chimiques et industriels de l'agriculture sans oublier le rôle qu'il joue dans la séquestration du carbone et donc dans la régulation du changement climatique. Ainsi, la matière organique et l'atténuation de l'érosion sont les clés de la qualité des sols.

Dans le cadre de préparation du Master 2 (Ben Aoun, 2010), nous avons opté pour la construction d'un modèle économique de contrôle optimal où nous avons écrit les conditions nécessaires d'optimalité correspondantes et nous avons discuté l'équilibre de long terme dans un premier temps. A ce niveau, nous avons construit d'une manière intuitive une fonction de production et une fonction représentant la qualité du sol (teneur en matière organique). Nous avons fait l'hypothèse que l'agriculteur peut s'investir dans la lutte contre la dégradation du sol en y consacrant du travail. Ensuite, à l'aide de la statique comparative, nous avons cherché à voir l'effet d'une variation des prix sur les choix optimaux de l'agriculteur. Les résultats de cette étude théorique ont montré que les instruments de politiques semblent être indispensables pour lutter contre la dégradation de la qualité du sol. La construction intuitive des hypothèses sur la technologie de production et sur la qualité du sol ainsi que la difficulté de comprendre le processus biophysique étaient les principales limites de ce travail.

Dans la présente étude, on s'intéresse à évaluer l'effet des instruments de politiques visant la conservation du sol sur les décisions des agriculteurs en matière d'allocation des ressources, du choix des cultures et des techniques de production et leurs impacts sur la durabilité de l'utilisation des terres agricoles. Pour pouvoir mener à bien une telle analyse, il s'avère indispensable de tenir compte de la complexité de ce genre de travaux qui font appel à plusieurs disciplines.

I. Intérêt pour la modélisation bioéconomique

La modélisation bioéconomique représente un cadre qui permet de mener une analyse intégrée d'un système complexe où interviennent des composantes biophysiques, socioéconomiques et politiques (Flichman, 1997). Le principe de la modélisation bioéconomique est basé sur le couplage d'un modèle économique modélisant les décisions de l'agriculteur à un modèle agronomique (biophysique) estimant les fonctions de production d'ingénieur et d'externalités (voir paragraphe 3 du chapitre II). Sa conceptualisation a commencé depuis les années 70 avec l'idée d'intégrer une composante de modélisation biologique à des modèles économiques lorsque les choix techniques sont fortement soumis à l'influence des facteurs biologiques, ce qui permet de mieux rendre compte des décisions techniques (Abbes, 2005) [cité par Ghali, 2007].

Cette approche n'avait pas pour but d'analyser les impacts des politiques en économie agricole, mais plutôt dans une perspective normative de trouver la solution optimale à un problème de gestion de ressources naturelles (Flichman et Jacquet, 2003). Toutefois, la modélisation bioéconomique peut éclairer la prise de décision en matière de formulation de politiques à adopter et elle offre l'avantage de pouvoir s'appliquer sur différentes échelles.

Selon Janssen et van Ittersum (2007), un modèle bioéconomique est défini comme un modèle qui relie les formulations décrivant les décisions de gestion des ressources des agriculteurs à des formulations qui décrivent les possibilités de production actuelles et alternatives en termes d'intrants nécessaires à la réalisation de certains outputs et externalités associées.

1. Les modèles agronomiques

L'approche économique de l'utilisation des ressources naturelles en agriculture requiert une analyse des différentes options techniques à partir d'une perspective économique. Ces options sont représentées par les fonctions de production dites « d'ingénieur ». Ainsi, le facteur principal rendant la modélisation bioéconomique possible est le modèle de simulations agronomiques (Flichman, 1997). D'ailleurs, les modèles bioéconomiques ne diffèrent des modèles économiques que par le fait qu'ils intègrent des données venant des modèles biophysiques.

Les modèles biophysiques nous permettent de faire des simulations de croissance des plantes tout en tenant compte des interactions entre la plante et le climat, la pédologie, le travail du sol etc. Ils tendent à retracer le comportement réel des plantes en établissant les rapports inputs/outputs concernant la production végétale. L'économiste construit donc la fonction de production d'ingénieur sur la base de ces rapports inputs-outputs.

Bien entendu, ces fonctions concernent aussi bien la production que l'externalité générées par des mécanismes agronomiques et biologiques bien déterminés (Ghali, 2007).

Parmi les modèles biophysiques capable de mesurer l'effet du sol, du climat et des pratiques culturales sur les rendements des produits agricoles tout comme la qualité du sol (profondeur, lixiviation d'azote...) nous citons :

- **EPIC** (*Erosion Productivity Impact Calculator*): développé pour simuler les effets du sol, du climat et des pratiques culturales sur l'érosion pour déduire l'effet à long terme sur les rendements. Il est notable que ce modèle a été amélioré par l'équipe de l'INRA de Toulouse en vue de simuler l'agriculture irriguée avec plus de précision (Flichman, 1997).
- **APES** (*Agricultural Production and Externalities Simulator*): c'est un modèle modulaire de simulation développé dans le cadre du projet européen SEAMLESS pour estimer les processus biophysiques des systèmes de production agricole en réponse aux conditions climatiques et aux différentes techniques de production. Il permet de déterminer les rendements et les niveaux d'externalités pour plusieurs niveaux d'inputs.
- **CROPSYST** (*Cropping Systems Simulation Model*): il sert à étudier les effets du climat, des sols et des pratiques culturales sur la productivité de l'environnement et des systèmes de production. C'est

un modèle à pas journalier, multi annuel (Ghali, 2007). Avec ce modèle, nous pouvons arriver à simuler les rendements des cultures, l'érosion du sol, le bilan d'eau drainée...

Ainsi, les résultats (outputs) des modèles biophysiques servent comme inputs pour les modèles économiques.

2. Les modèles économiques

Les modèles économiques sont le plus souvent énoncés sous forme de modèles de programmation mathématiques (MPM). Ils permettent d'obtenir la combinaison optimale de différentes activités concourant à la réalisation d'un objectif déterminé et limitées par différentes contraintes.

L'hypothèse de base des modèles de programmation stipule que la rationalité d'un individu consiste à maximiser une fonction d'utilité sous contraintes.

Cette hypothèse issue de la théorie néoclassique a fortement contribué au développement de cette approche en tant qu'outil d'aide à la décision (Bortzmeyer, 1992) [cité par Ghali, 2007].

A ce niveau, il importe de signaler qu'il existe deux approches différentes quand on traite des modèles de programmation mathématique (Flichman et Jacquet, 2003) et qui sont les suivantes :

- **l'approche normative** : c'est une approche qui cherche à trouver la solution optimale pour l'allocation des ressources.

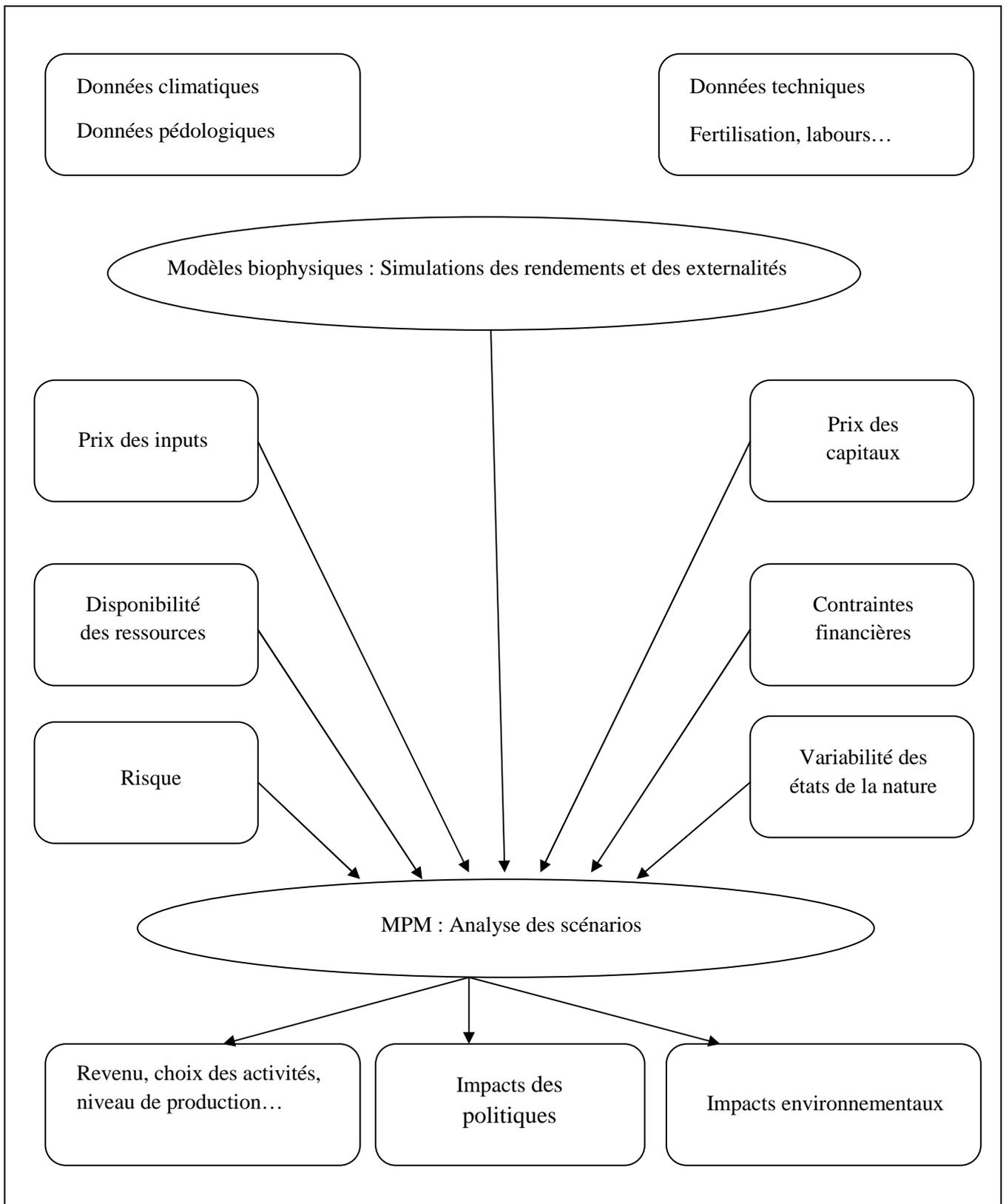
- **l'approche positive** : c'est une approche qui cherche à modéliser le comportement actuel de l'agriculteur.

Quelle que soit la nature du MPM adopté (statique ou dynamique), il semble plus attirant de suivre l'approche positive qui, à travers la reproduction des comportements des agriculteurs, permet de fournir des résultats pertinents en matière d'analyse des politiques.

Par contre, l'analyse des scénarios de politiques doit se faire selon une approche normative.

Ainsi, la modélisation bioéconomique aujourd'hui est capable de générer simultanément des résultats économiques et écologiques appréhendés comme des réalités physiques ce qui évite d'avoir recours à une évaluation monétarisée. Le schéma suivant illustre les différentes étapes de modélisation bioéconomique.

Figure 3 : Présentation d'un modèle bioéconomique



Source : Flichman (1997)

II. Revue de la littérature

Comme il a été souligné dans la problématique de ce travail, il est fortement connu que l'utilisation des fertilisants, des pesticides et des technologies en agriculture moderne peut compenser et masquer les pertes de productivité associées à la dégradation de la qualité du sol mais non pas d'une façon durable.

Avec l'émergence de la notion de durabilité à la surface de tous les discours politiques, plusieurs travaux de recherche ont été lancés depuis la fin des années 80 et jusqu'à présent afin de quantifier l'effet de la prise en considération de la qualité des sols sur la production et sur le revenu des exploitants agricoles ainsi que d'évaluer l'efficacité des instruments de politiques utilisés dans la lutte contre la dégradation des sols.

Pour ce qui est des modèles économiques de contrôle optimal, les résultats des travaux menés par Mc Connel (1983), Van Koten *et al* (1990), Jai Singh et Jai pas Singh (1995) et Hopkins *et al* (2001) convergent vers le fait que la gestion des sols demeure une priorité de beaucoup d'agriculteurs qui ne sont pas prêts à s'investir dans l'entretien de la qualité de leurs sols. Il est notable que la majorité de ces travaux étaient théoriques et manquaient d'empirie.

Avec la manifestation des différents processus de dégradation des sols un peu partout dans le monde, plusieurs travaux de recherche basés sur la modélisation bioéconomique ont été faits.

Dans un essai pour étudier l'impact de la pression démographique et de la pression du marché sur l'adoption des techniques de conservation du sol, Barbier (1998) a développé un modèle bioéconomique de la manière suivante : il a combiné un modèle récursif dynamique de programmation linéaire avec un modèle biophysique qui prédit les rendements et le niveau de dégradation pour différents types de sol et pour différentes utilisations et systèmes de culture. Après avoir déterminé les paramètres de la fonction de production sur la base des résultats du modèle EPIC, l'auteur a utilisé un modèle multi-périodique. La récursivité stipule que les résultats de la première année de l'horizon de planification deviennent la ressource initiale du nouveau modèle résolu pour l'année qui suit et ainsi de suite. Les principaux résultats de cette étude menée dans un village de l'Afrique de l'ouest se concentrent sur le fait que la pression démographique conduit à s'investir dans des pratiques de conservation du sol mais pas forcément à des revenus meilleurs.

Croyant que le comportement des ménages agricoles suite à un changement de l'état d'une ressource naturelle comme le sol est assez complexe, Kruseman et Bade (1998) ont construit un modèle bioéconomique pour évaluer l'efficacité des instruments de politique et ce afin d'améliorer le revenu des ménages agricoles et la fertilité du sol. L'objectif de cette recherche était de simuler les décisions du ménage en matière d'allocation des terres et de choix des techniques de production tout en tenant compte des conditions du marché. Les auteurs pensent que la technologie toute seule n'est pas suffisante pour conduire les exploitants agricoles à adopter des systèmes de production durables et que des incitations économiques supplémentaires sont nécessaires pour favoriser le progrès technologique. Ce travail souligne l'avantage des modèles bioéconomiques qui permettent de travailler dans un cadre modulaire où l'incorporation de plusieurs données et paramètres est beaucoup plus flexible.

Mimouni *et al* (2000) se sont intéressés à développer un modèle bioéconomique afin d'établir un *trade-off* entre le revenu de l'exploitation et la réduction de l'érosion et de la pollution par les nitrates. Après avoir utilisé le modèle EPIC pour simuler les rendements et les externalités, les auteurs ont eu recours à un modèle de programmation multi-objectif afin de pouvoir traiter un problème de maximisation de la marge brute en parallèle avec la minimisation de l'érosion et de la pollution par les nitrates. Les résultats trouvés montrent que les pertes de nitrate et de sol sont importantes dans les terres menées en sec tout comme dans les terres irriguées. De plus, les auteurs confirment que l'agriculteur peut atténuer le problème environnemental sans affecter la marge brute tant qu'il agit selon la courbe d'efficience.

Ghali (2007) a utilisé un modèle bioéconomique de type statique comparatif pour analyser les rapports entre les décisions de production et le processus d'érosion dans une exploitation dans la région Midi-Pyrénées et ce afin d'étudier le rôle des mesures agri-environnementales dans l'atténuation de ce phénomène. L'auteur a montré que des mesures comme l'implantation des bandes enherbées et l'entretien

minimal des terres conduit à une légère baisse du revenu mais qui permettent en revanche de réduire significativement le niveau d'érosion.

L'érosion du sol représente l'une des externalités environnementales les plus importantes. Elle menace la durabilité des systèmes agricoles. En partant de ce constat, Louhichi *et al* (2010) ont utilisé un modèle bioéconomique pour estimer le niveau d'érosion généré par les systèmes de culture courants en Tunisie ainsi que pour évaluer les impacts économiques et écologiques des instruments de politique conçus pour gérer ce problème. Cette recherche a précisé que l'utilisation des techniques intensives permettant d'améliorer les rendements peut être accompagnée par des changements importants au niveau du stock du sol. En ce qui concerne les instruments de politique, les auteurs pensent que les incitations à adopter des mesures anti érosives apparaissent plus efficaces que les politiques environnementales conventionnelles telles que les taxes pigouviennes ou les systèmes de quotas, surtout quand le taux d'intérêt est relativement faible. D'ailleurs, l'implantation des pratiques conservatrices du sol peuvent conduire à une diminution nette de l'érosion et à une amélioration du revenu de l'exploitation.

Cette revue de la littérature n'est pas exhaustive mais nous donne une vue d'ensemble sur ce qui existe. Cependant, nous pouvons confirmer que les problèmes de dégradation des sols et la recherche de la conservation de leur qualité sont fréquemment analysés par des modèles bioéconomiques. La majorité des travaux collectés soulignent l'utilité d'envisager de travailler avec des modèles dynamiques qui nous offrent l'avantage de mieux tenir compte du futur et de mieux juger l'impact à long terme des pratiques agricoles.

III. Quelques orientations pour la spécification du modèle

1. Insertion de la technologie dans le modèle

Le progrès technique en agriculture (plantes améliorées, fertilisants super phosphate...) amplifie la productivité du sol en parallèle avec plusieurs indicateurs de qualité des sols tels que la perte de profondeur, l'augmentation de la salinité et de l'acidité. Ainsi, les effets de l'amélioration de la technologie cachent ou limitent les effets des changements des propriétés du sol. Par conséquent, il s'avère intéressant de maintenir la technologie constante pour pouvoir juger l'intensité de la dégradation de la qualité du sol. Autrement dit, on suppose qu'au moins sur le court terme, on n'est pas capable de compter sur un correctif technologique pour résoudre le problème de dégradation. Cette hypothèse permet d'isoler l'effet technologique de l'effet économique.

2. Considération des effets hors site de la dégradation

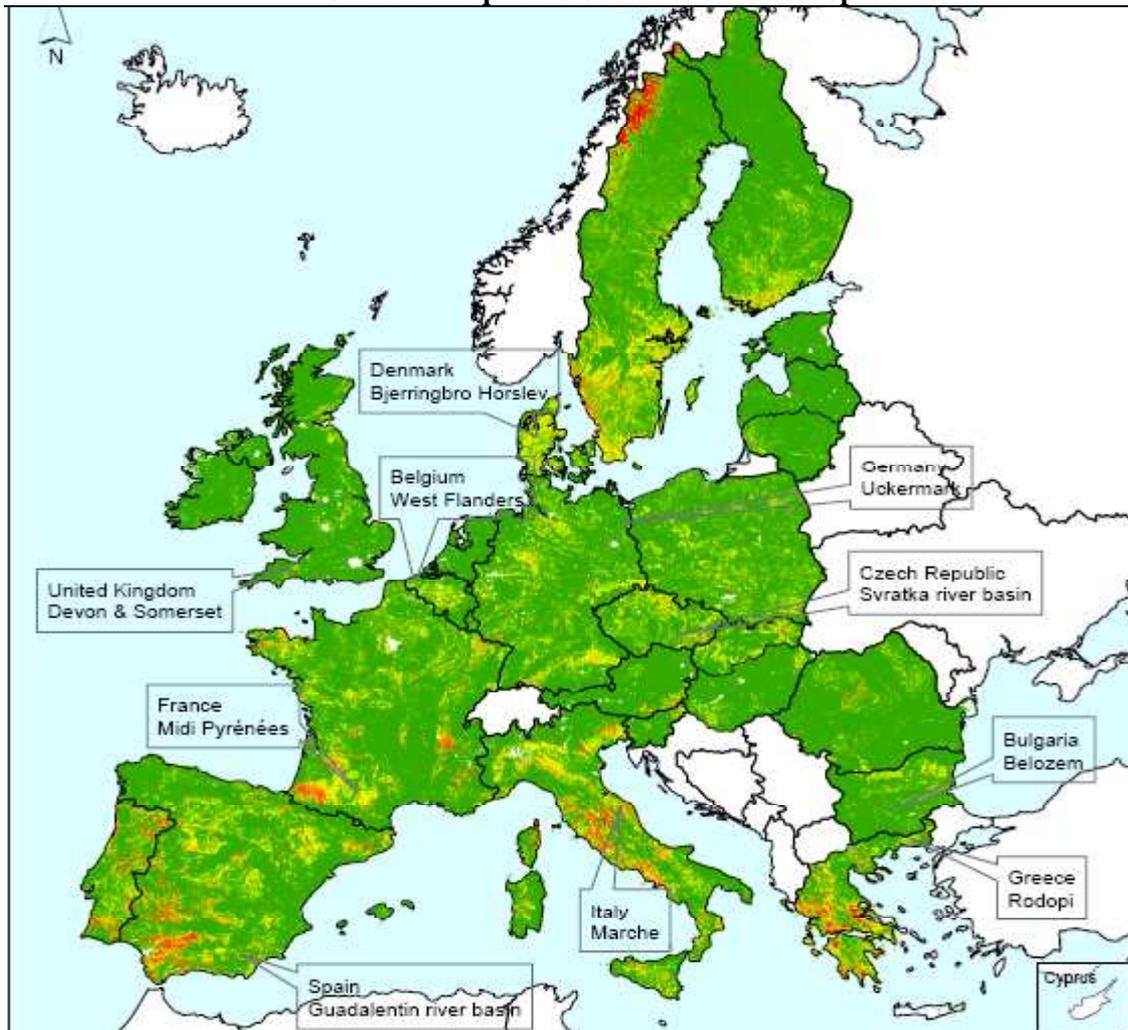
Les effets hors site de la dégradation de la qualité des sols définis dans le premier chapitre ne présentent pas d'incitation économique pour que les agriculteurs y accordent une attention particulière. C'est une sorte d'externalité négative de l'exploitation, où l'activité de l'agriculteur affecte l'activité d'autres agents sans que ça soit observé sur le marché (ex : sédimentation des réseaux d'irrigation ou des barrages à cause de l'érosion). Les prix du marché ne reflètent donc pas ces effets. Ainsi, il semble préférable de ne pas considérer les effets hors site de la détérioration de la qualité des sols dans la modélisation du comportement d'un agriculteur rationnel.

3. L'atténuation de l'érosion : la clé de la conservation de la qualité du sol

Nous savons que l'érosion du sol est un processus très frappant partout dans le monde. L'érosion hydrique ou éolienne entraîne des pertes plus ou moins importantes dans la profondeur du sol. C'est un indicateur de dégradation irréversible où le taux de renouvellement du sol est négligeable devant le taux de perte du sol. Donc, un sol touché par l'érosion facilite l'occurrence d'autres processus de dégradation notamment le déclin des teneurs en matières organiques. Un tel processus conduit à une perturbation des cycles des plantes et conduit certainement à une baisse de productivité. Ainsi, la perte du sol serait sans doute une variable proxy très intéressante de la qualité du sol qui permet de traiter le problème de dégradation irréversible autant que celle réversible.

En se basant sur la figure ci-dessous, nous choisissons d'appliquer notre modèle bioéconomique sur une exploitation relevant de la région Midi-Pyrénées, une région à risque érosif important.

Carte 1: Risque d'érosion des terres européennes



Risque d'érosion (tn/ha/an)



Source : European commission (2009)

4. Le modèle bioéconomique retenu : un modèle récursif

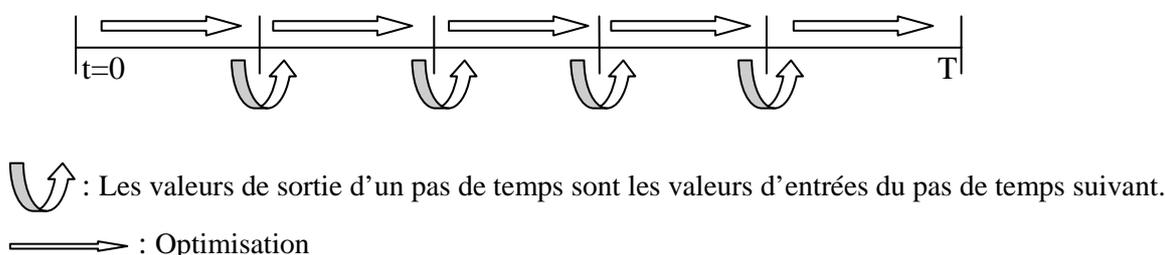
Après avoir choisi la perte du sol comme indicateur de la dégradation de la qualité du sol, cette étude cherchera à mieux tenir compte du caractère dynamique de cette dégradation. En effet, une production jointe telle que l'érosion est à l'origine d'une baisse irréversible du stock du sol. La perte du sol générée par les différentes activités de l'exploitation s'accumule d'une saison à une autre. Au cas où il n'existe pas de mesures préventives et conservatrices du sol, ce cumul de perte de sol peut conduire à un stock de sol assez faible et par la suite entraîner une chute importante des rendements. Dans les cas extrêmes, la perte du sol risque d'entraîner l'abandon de toute activité agricole au bout d'un certain nombre d'année.

A partir de ce constat, nous pensons qu'il sera très intéressant d'élaborer un cadre de modélisation bioéconomique où on essaiera d'optimiser les décisions de l'agriculteur en matière d'allocation des ressources tout en lui permettant d'ajuster ses décisions au fur et à mesure en fonction du degré d'effet de

l'érosion sur la productivité de son exploitation. Cette idée nous permet d'incorporer le caractère dynamique de la qualité du sol.

L'introduction de la récursivité dans le cadre de modélisation semble utile pour pouvoir répondre à un tel objectif. En effet, les modèles récursifs sont des modèles dynamiques dans la mesure où l'on représente de manière explicite différentes périodes de décision. L'exemple typique de l'utilisation de la procédure récursive se trouve dans la recherche de l'équilibre du marché avec déphasage temporel (le modèle *cobweb*). La différence avec les modèles d'optimisation inter-temporelle réside dans la façon d'optimiser : au lieu d'optimiser sur l'ensemble de l'horizon de planification, l'optimisation est faite pour chaque pas de temps individuellement mais les résultats du pas de temps t vont influencer les données de départ dans le pas de temps $t+1$. Ainsi, la programmation récursive est une approche de modélisation des comportements économiques basée sur la décomposition du problème en une séquence de modèles où on effectue une réinitialisation après chaque optimisation. Une fois réinitialisé, le modèle tourne avec un nouvel horizon de planification décalé d'un pas de temps. Janssen et Van Ittersum (2007) affirment que la modélisation récursive pourrait être une bonne procédure pour rendre les modèles plus dynamiques.

Figure 4 : Principe de la modélisation récursive



Source : Janssen et Van Ittersum (2007)

Le tableau ci-dessous schématise le cadre de modélisation que nous adopterons dans cette étude :

Tableau 1 : Principales caractéristiques du modèle retenu

Type du modèle	Modèle bioéconomique
Modèle biophysique	Cropsyst : simulation des rendements et des niveaux d'érosion pour chaque activité
Modèle économique	Modèle de programmation mathématique de type récursif
Types d'outputs	Le plan de production, le revenu, le niveau de l'externalité

IV. Méthodologie

La conservation du sol figure parmi les problèmes de gestion des ressources naturelles les plus complexes. Ce constat découle du fait que selon l'angle sous lequel nous étudions le problème, sa compréhension et son analyse diffèrent. Dans notre étude, nous considérons que la dégradation de la qualité du sol est une production jointe de l'activité agricole. L'érosion du sol représente un indicateur important de cette qualité. A ce niveau, nous insistons sur le fait que la dégradation du sol dépend en grande partie du processus de production utilisé pour produire et non pas du produit cultivé.

1. Choix de la zone d'étude

En se basant sur la figure 4, nous choisissons de travailler sur une exploitation dans le Midi-Pyrénées, région connue par la présence pesante du phénomène d'érosion. D'ailleurs, nous retenons la même zone explorée par l'étude de Ghali (2007).

Il s'agit d'une exploitation de grandes cultures située dans le Lauragais, zone caractérisée par un risque érosif très fort. La superficie agricole utile (SAU) de l'exploitation est de l'ordre de 110 ha. Elle est marquée par la présence de deux types de sol à savoir le sol terrefort et le sol bouldène.

Le premier sol a un caractère érosif et s'étend sur 60 ha dont 20% sont irrigables alors que le deuxième sol s'étend sur 50 ha dont 50% irrigables.

L'agriculture pratique en général six type de cultures :

- des céréales : le blé dur (BD), le blé tendre (BT), l'orge, le maïs ;
- des oléagineux : le tournesol (TS), le soja ;
- la jachère : instaurée obligatoirement dans le cadre de la politique agricole commune (PAC).

Il est notable que seules les cultures de soja et du maïs sont cultivées en irrigué. En effet, leurs rendements dépendent fortement de la présence de l'eau.

2. Les activités productives

La détermination des composantes des activités de production conditionne fortement les résultats obtenus. Généralement, l'agriculteur entreprend une activité productive en se basant sur cinq éléments principaux :

- la culture à pratiquer : blé dur, blé tendre, maïs, orge, tournesol, soja, jachère ;
- le précédent cultural : blé dur, blé tendre, maïs, orge, tournesol, soja, jachère ;
- le type du sol : sol terrefort, sol bouldène ;
- l'itinéraire technique utilisé : culture en sec, culture en irrigué ;
- le système de production utilisé : le système conventionnel ; le système de conservation.

Tableau 2 : Présentation des composantes des activités productives

Composantes de l'activité agricole		Abréviation
Cultures (c)	Blé tendre	BT
Précédent cultural (pc)	Blé dur	BD
	Maïs	Maïs
	Orge	Orge
	Jachère	Jachère
	Tournesol	TS
	Soja	Soja
Sols	Terrefort	s1
	boulbène	s2
techniques	En sec	t1
	En irrigué	t2
Systèmes	Conventionnel	conv
	De conservation	cons

3. Le système de conservation : outil d'atténuation de l'érosion

Nous insistons sur le fait que c'est l'activité de production qui est responsable de l'érosion et non pas le produit. Comme présenté ci-dessus, l'élément principal de l'activité de production qui dégrade le sol est le système de production. Nous pensons que le système de production joue un rôle important dans la conservation du sol et sa prévention de l'érosion. Dans ce qui suit, nous séparerons un système qui ne se préoccupe pas de la protection du sol et un autre système qui aide à conserver le sol. En effet, le système conventionnel signifie un travail du sol intensif ce qui le rend plus vulnérable à l'érosion surtout avec l'utilisation d'outils de labour profond, alors que le système de conservation est basé sur des pratiques de labour minimal avec plus de recours à la fertilisation. L'adoption d'un système de conservation conduit à une utilisation plus modérée du sol et contribue fortement à sa préservation.

En revanche, nous estimons que l'adoption d'un tel système demande des dépenses supplémentaires par rapport au premier système vu les charges supplémentaires dues à l'utilisation des engrais ainsi qu'à l'achat de nouveaux équipements. Après la consultation d'un avis d'un expert, nous pensons que la différence entre les rendements des deux systèmes n'est pas assez significative. Ainsi, nous pénalisons l'adoption d'une activité basée sur le système de conservation par l'augmentation des coûts de 5% par rapport à une même activité qui utilise un système conventionnel et nous gardons le même niveau de rendements pour les deux systèmes.

4. Origine des données économiques et biophysiques

La première étape de la modélisation bioéconomique consiste à générer les données biophysiques qui vont être utilisées par la suite dans le modèle de programmation mathématique. Ainsi, l'utilisation du modèle Cropsyst nous a permis de simuler les rendements moyens et les niveaux de perte du sol par culture, sol, technique et système. Les coefficients économiques (prix, coûts...) associés aux différentes cultures proviennent de la base de données de la chambre d'agriculture du Midi-Pyrénées.

5. Le modèle bioéconomique

A. Présentation générale

Quels sont les facteurs qui influencent les décisions des agriculteurs ? Dans quel sens évoluera la qualité du sol ? L'objectif de cette analyse est de mieux éclairer le comportement économique des agriculteurs face à une dégradation de la qualité de leurs sols en raison du processus de l'érosion.

Dans une optique de représentation réaliste du phénomène de l'érosion et du choix de l'agriculteur, nous cherchons la combinaison optimale entre les différentes activités de production tout en respectant un certain nombre de contraintes. On se propose donc de créer un modèle microéconomique pour discuter

l'effet de l'érosion à long terme sur le comportement de l'agriculteur et donc sur les processus biophysiques et économiques. On utilisera un modèle bioéconomique récursif pour étudier les choix de l'agriculteur et les éventuelles interventions publiques à apporter.

La structure générale du modèle s'écrit comme suit :

$$\begin{aligned} \text{Max} F &= \sum_i B_i X_i \\ \text{Sous contraintes :} \\ \sum_i a_{ki} X_i &\leq b_k \\ X_i &\geq 0 \end{aligned} \quad (1)$$

Avec :

F : une fonction objectif à optimiser ;

B_i : le bénéfice de chaque activité i ;

X_i : la superficie de l'activité i

a_{ki} : coefficients techniques pour chaque facteur de production k ;

b_k : la disponibilité en facteur de production k .

B. La fonction objectif

En modélisation économique, l'identification et la hiérarchisation des objectifs permettent de distinguer un objectif principal et des objectifs secondaires, qui sont modélisés sous forme de contraintes (Ghali, 2007). Comme nous avons estimé qu'il suffit de considérer un certain risque (marché, climat) pour représenter le problème que stipule notre étude d'une manière proche de la réalité, l'objectif principal de la présente étude sera de maximiser le revenu net espéré tout en tenant compte de ce risque. La méthode utilisée est l'espérance écart type, une méthode qui permet en même temps de calibrer approximativement le modèle.

Ainsi nous sommes en présence d'une fonction objectif qui maximise le revenu tout en minimisant ses fluctuations :

$$U = Z - (\text{PHI} * \text{STDV}) \quad (2)$$

Avec :

U : utilité

Z : le revenu

PHI : le coefficient d'aversion au risque. Nous avons retenu une valeur de l'ordre de 1,65. Il s'agit de la valeur trouvée par le modèle de Ghali (2007) et pour laquelle le modèle donne des résultats proches de la réalité.

STDV : la variation standard du revenu

L'équation permettant de calculer le revenu s'écrit comme suit :

$$Z = \sum_{c,pc,s,t,sys} (X_{c,pc,s,t,sys} * Y_{c,pc,s,t,sys} * P_c) - \sum_{c,pc,s,t,sys} (X_{c,pc,s,t,sys} * C_{c,s,t,sys}) \quad (3)$$

Avec :

$X_{c,pc,s,t,sys}$: superficie par activité de production (ha) ;

$Y_{c,pc,s,t,sys}$: rendement par activité de production (quintal/ha) ;

P_c : prix par culture (euros/quintal) ;

$C_{c,s,t,sys}$: coûts par activité (euros/ha)

La déviation standard du revenu (écart-type) est calculée d'une façon endogène à partir des déviations totales entre le revenu net Z et le revenu en fonction des états de la nature :

$$STDV = \sqrt{\sum_{nat} DEV_{nat}^2 / 100} \quad (4)$$

Avec :

100 : nombre des états de la nature ;

Nat : état de la nature ;

DEV_{nat} : déviation du revenu pour chaque état de la nature, $DEV_{nat} = ZN_{nat} - Z$

ZN_{nat} : revenu par état de la nature :

$$ZN_{nat} = \sum_{c,pc,s,t,sys} (X_{c,pc,s,t,sys} * Y_{c,pc,s,t,sys} * P_{nn_{c,nat}}) - \sum_{c,pc,s,t,sys} (X_{c,pc,s,t,sys} * C_{c,s,t,sys}) \quad (5)$$

$P_{nn_{nat}}$: prix des cultures par état de la nature.

C. Les contraintes technico-économiques

a) Occupation du sol

Cette contrainte nous permet de tenir compte de la disponibilité en SAU, c'est-à-dire que dans notre modèle, la somme des terres où les différentes activités seront pratiquées ne doit en aucun cas dépasser la SAU totale de l'exploitation. Comme on est en présence de deux types de sol, nous écrivons cette contrainte comme suit :

$$\sum_{c,pc,t,sys} X_{c,pc,t,sys} \leq TERRE_s \quad (6)$$

Avec :

$\sum_{c,pc,t,sys} X_{c,pc,s,t,sys}$: La superficie par chaque type de sol ;

$TERRE_s$: superficie disponible par type du sol.

Il est important de mentionner qu'il existe une contrainte concernant les terres irrigables. En effet, la somme des superficies irriguées ne doit pas dépasser la superficie irrigable par type de sol. On écrit cette contrainte de la manière suivante :

$$\sum_{c,pc,ti,sys} X_{c,pc,s,ti,sys} \leq TERRE_s * IRR(s) \quad (7)$$

Avec :

ti : technique irriguée ;

IRR(s) : pourcentage des terres irrigables par type de sol.

b) Les précédents cultureux

Il est connu que chaque culture peut avoir un effet négatif ou positif sur le rendement de la culture suivante ainsi qu'elle contribue significativement dans la régulation de la vulnérabilité du sol à l'érosion. Par exemple, une céréale n'aura pas le même rendement si elle est cultivée en monoculture ou si elle est incluse dans une rotation. De ce fait, le précédent cultural joue un rôle important dans la spécification de l'activité de production. La modélisation de la rotation s'avère donc indispensable.

Après avoir pris en compte toutes les combinaisons possibles entre les différentes cultures, le raisonnement adopté consiste à choisir le type de culture à pratiquer sur une superficie donnée durant le pas de temps t en fonction des cultures qui étaient pratiquées durant le pas de temps t+1 et qui ont un effet plus ou moins favorable sur cette même culture. Cette contrainte de rotation s'écrit comme suit :

$$\sum_{c,t,s,sys} X_{c,'culture',s,t,sys} \leq \sum_{pc,t,s,sys} X_{'culture',pc,s,t,sys} \quad (8)$$

D. Obligation de la jachère

En référence au règlement de la PAC, un taux de jachère égale à 10% de la superficie allouée aux cultures de céréales, oléagineux et protéagineux (SCOP) est obligatoire. Ce pourcentage minimal est indispensable pour pouvoir bénéficier des aides européennes. Cependant, un taux maximal de 30% de la SCOP ne peut pas être dépassé (*Ghali, 2007*). Nous écrivons les deux contraintes de la jachère de la manière suivante :

$$\sum_{pc,s,t,sys} X_{jachere',pc,s,t,sys} \geq 0.1 * \sum_{c,pc,s,t,sys} X_{c,pc,s,t,sys} \quad (9.1)$$

$$\sum_{pc,s,t,sys} X_{jachere',pc,s,t,sys} \leq 0.3 * \sum_{c,pc,s,t,sys} X_{c,pc,s,t,sys} \quad (9.2)$$

NB : dans l'exploitation sur laquelle nous travaillons, la SCOP est équivalente à la SAU.

E. Considération de l'érosion

L'équation de l'érosion est formulée comme un comptage des tendances. Elle consiste à introduire une équation de comptage de l'érosion générée par les diverses activités dans le modèle. Nous rappelons que les valeurs de l'érosion sont générées à partir des simulations effectuées à l'aide du modèle biophysique et sont introduites dans le modèle économique sous forme de paramètre.

Pour l'érosion par culture, l'équation s'écrit comme suit :

$$\sum_{pc,s,t,sys} X_{c,pc,s,t,sys} * eros_{c,pc,s,t,sys} = EROSL(c) \quad (10.1)$$

Pour l'érosion au niveau de la ferme :

$$\sum_c EROSL(c) = erost \quad (10.2)$$

Avec :

$EROS_{c,ps,s,t,sys}$: niveau d'érosion par activité.

6. Introduction de la récursivité dans le modèle : le méta modèle linéaire

L'introduction de la récursivité dans un modèle tel que le nôtre s'annonce d'une grande utilité. En plus de la prise en compte des mutations que peut subir le stock du sol suite au processus d'érosion, un processus qui paraît inévitable dans la zone d'étude, le travail dans un cadre récursif nous permet de mettre à jour les niveaux de rendement des différentes activités pratiquées par l'agriculteur. Ainsi, la récursivité nous offre la possibilité d'étudier le comportement d'un agriculteur face à une dégradation de son sol sur le long terme tout en veillant à mettre le point sur le caractère dynamique de la dégradation, dans la mesure où il tient compte de l'évolution de la qualité du sol et de son influence sur les rendements.

Dans cette optique et par analogie au travail fait par Belhouchette (2004) pour évaluer la durabilité des successions culturales, nous proposons d'inclure une fonction linéaire dans notre modèle bioéconomique qui permet de réinitialiser les données concernant le stock du sol perdu ainsi que les données se rapportant aux rendements des différentes activités.

A. Réinitialisation du stock du sol perdu

L'utilisation du modèle biophysique CROPSYST nous a permis de déterminer les pertes moyennes du stock du sol par activité et par hectare. Cette perte du sol est due au processus d'érosion. A première vue, nous remarquons que la perte du sol est présente pour les deux systèmes (conventionnel et de conservation). Cependant, les résultats montrent que pour toutes les activités, l'adoption d'un système de conservation génère une perte de sol inférieure à celle produite par le système conventionnel.

Comme on se retrouve dans une zone avec des pentes élevées et un risque érosif important, nous estimons que la perte du sol est nettement supérieure au taux de régénération du même sol. Donc, nous considérons que la perte du sol produite est totalement irréversible.

De ce point de vue, la perte du sol s'accumule d'une campagne à une autre pour atteindre des niveaux de plus en plus importants au fil du temps. A la fin de chaque pas de temps, on réinitialise le stock du sol perdu en calculant la perte du sol générée par l'assolement choisi par le modèle. L'équation correspondante s'écrit comme suit :

$$(11) \quad \text{eros}_{(c,pc,s,t,sys)t+1} = \text{eros}_{(c,pc,s,t,sys)t} * X.L_{(c,pc,s,t,sys)}$$

Avec :

$X.L_{(c,pc,s,t,sys)}$: superficie allouée pour chaque activité (déterminée par le modèle)

B. Réinitialisation des rendements

Certes, la perte du sol et son accumulation au fil du temps affectent négativement les niveaux des rendements. Pour simplifier les calculs, nous choisissons d'établir une relation linéaire afin de tenir compte de l'éventuelle baisse des rendements suite à la perte du sol :

$$(12.1) \quad Y_{(c,pc,s,t,sys)t+1} = Y_{(c,pc,s,t,sys)t} - (\text{eros}_{(c,pc,s,t,sys)t} * \beta)$$

Avec :

$Y_{(c,pc,s,t,sys)}$: rendement par activité

β : perte de rendement produite en raison de la perte d'une tonne du sol (en %)

A ce niveau, il importe de signaler que quelle que soit la nature du système adopté c'est-à-dire conventionnel ou de conservation, la perte de rendement générée par la perte d'une tonne du sol (β) est la même. Par contre, cette perte de rendement varie selon le type de sol. Par exemple, si l'agriculteur produit du blé dur via deux systèmes de production sur le même type de sol, la baisse de rendement produite au fil du temps sera la même, mais s'il fait du blé sur deux types de sol différents, la baisse de revenu ne sera pas identique. Après consultation d'un avis d'expert, nous avons retenu deux valeurs différentes de ce coefficient (β) pour les deux types de sol S1 et S2 :

$\beta_1 = 2,5\%$: pour le sol terrefort (S1), la perte d'une tonne de sol entraîne une baisse du rendement par rapport à la campagne précédente de l'ordre de 2,5%.

$\beta_2 = 1,5\%$: pour le sol bouldène (S2), la perte d'une tonne de sol entraîne une baisse du rendement de l'ordre de 1,5%.

A la fin de chaque pas de temps, on réinitialise les rendements par activité en fonction du type et de la perte du sol. L'équation correspondante est la suivante :

$$Y_{(c,pc,s,t,sys)t+1} = Y_{(c,pc,s,t,sys)t} - (eros_{(c,pc,s,t,sys)} * teta_{(s)}) \quad (12.2)$$

Le terme $teta(s)$ renvoie à la perte de rendement générée par la perte de 1 tonne de sol le long du pas de temps qui s'étend sur 10 ans. En d'autres termes, $teta(s)$ équivaut à $\beta(s)$ multiplié par dix :

$teta_1 = 25\%$: pour le sol terrefort (S1), la perte d'une tonne du sol chaque année entraîne une baisse du rendement de l'ordre de 25% à la fin de chaque pas de temps par rapport au pas de temps précédent.

$teta_2 = 15\%$: pour le sol boulbène (S2), la perte d'une tonne du sol chaque année entraîne une baisse du rendement de l'ordre de 15% à la fin de chaque pas de temps par rapport au pas de temps précédent.

Ce méta modèle composé de deux équations permet de réinitialiser les pertes du sol et les pertes du rendement à la fin de chaque pas de temps. C'est un outil pour dynamiser et donner un caractère récursif à notre modèle bioéconomique.

V. Exécution du modèle

Après avoir présenté la méthodologie utilisée pour représenter le comportement d'un agriculteur rationnel face à une dégradation de son sol suite au processus de l'érosion, nous avons lancé notre modèle afin de nous fournir l'assolement optimal pour chacune des situations suivantes :

- l'agriculteur maximise son utilité en absence de tout instrument de politique favorisant la lutte contre l'érosion ;
- l'agriculteur maximise son utilité en présence d'une subvention sur l'adoption d'un système de conservation ;
- l'agriculteur maximise son utilité en présence d'une taxe sur l'adoption du système conventionnel ;
- l'agriculteur maximise son utilité en présence de la même taxe et de la même subvention simultanément.

Dans un premier temps, nous exposerons les principaux résultats trouvés. Ensuite, nous discuterons ces résultats tout en cherchant à déterminer l'instrument de politique le plus bénéfique à mettre en place, au cas où il s'avère indispensable.

1. Modèle sans aucune intervention publique

L'une des hypothèses que nous souhaitons vérifier est celle qui dit que l'agriculteur est généralement conscient de la dégradation de la qualité de ses sols mais ne s'investit pas sur sa conservation tant qu'il n'enregistre pas des pertes de revenus. A ce niveau, on se demande s'il est indispensable d'avoir recours à un instrument de politique pour pousser l'agriculteur à s'investir sur la qualité de son sol en favorisant la pratique d'un système de conservation.

Après avoir essayé de reproduire au mieux l'assolement observé, nous avons tourné notre modèle récursif de base sur une dizaine de pas de temps, où chaque pas de temps est formé par dix campagnes agricoles.

Tableau 3 : Comparaison entre assolement réel et assolement simulé

	BT	BD	Maïs	TS	Soja	Orge	Jachère
réel	26	12	24	20	8	10	10
simulé	23,56	14,73	26,41	19,36	2,77	12,17	11

Les résultats trouvés montrent qu'en absence de toute intervention publique, on assiste à un passage progressif vers l'adoption d'un système de conservation pour toutes les activités, pénalisé au départ par son coût élevé par rapport au système conventionnel.

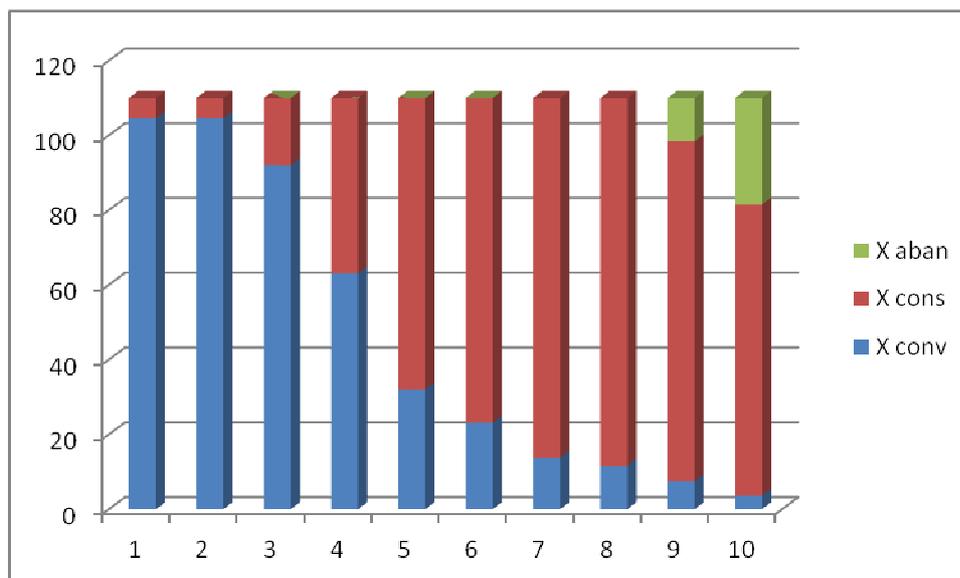
Tableau 4 : Evolution des superficies par culture et par système en ha (sans intervention)

Culture	Système	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
BT	conv	23,56	22,76	10,55							
	cons			12,50	24,27	25,16	24,37	24,10	25,17	23,71	20,51
BD	conv	14,73	13,83	14,43							
	cons				15,09	15,34	14,76	14,67	15,53	14,67	12,56
Maïs	conv	26,41	23,71	24,37	24,75	17,98	9,91				
	cons					5,79	13,19	23,22	24,73	24,04	22,13
TS	conv	19,36	14,90	12,66	10,15	2,81					
	cons					2,91	7,54	7,75	5,96	4,24	3,22
Soja	conv	2,77	10,59	12,00	10,15	5,72	7,54	7,75	5,96	4,24	3,22
	cons				2,10	7,51	6,35	6,03	6,32	8,73	11,65
Orge	conv	12,17	13,21	12,50	12,50						
	cons					15,78	15,32	15,48	15,34	8,89	
Jachère	conv	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,65	5,97	5,68	3,27	0,35
	cons	5,50	5,50	5,50	5,50	5,50	5,35	5,03	5,32	6,60	7,83
Total		110	98.38	81.48							

Au bout de 5 pas de temps, on note que 70% de la superficie emblavée devient conduite sous un système de conservation avant d'atteindre 95% au dixième pas de temps. Ce constat nous amène à dire que l'agriculteur ne s'intéresse à la conservation de ses terres que lorsqu'il constate que l'activité basée sur le système conventionnel n'est plus rentable. Seule la culture de soja reste partiellement pratiquée sous un système conventionnel sur tout l'horizon de planification. Ceci s'explique par le fait que la culture de soja ne peut être pratiquée que sur des terres irriguées, donc le seul précédent cultural qu'elle peut avoir est la culture de maïs. Les simulations du modèle Cropsyst montrent que l'érosion générée par la rotation soja-maïs est presque la même quel que soit le système de culture adopté.

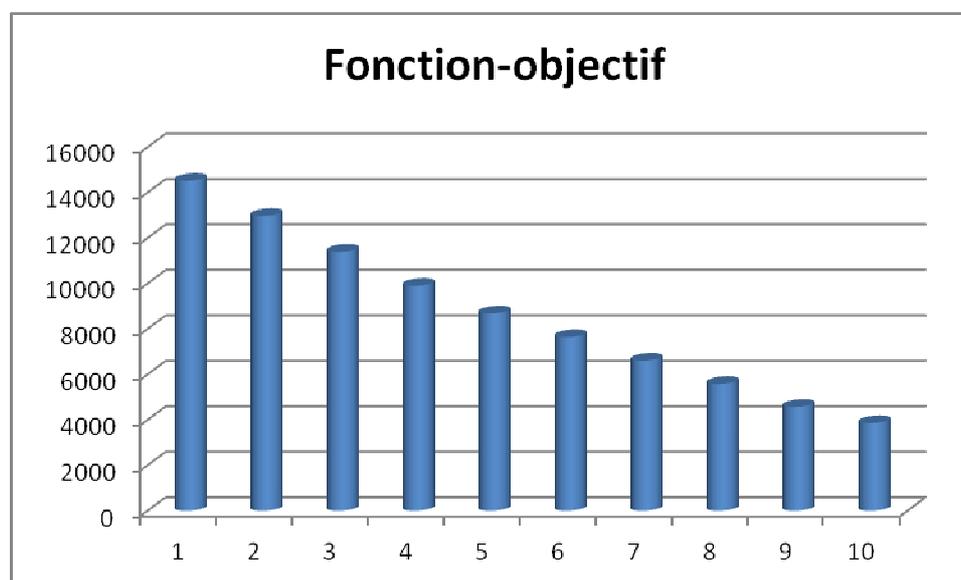
Avec un tel comportement de l'agriculteur, nous remarquons que même avec une migration progressive vers un système de conservation, l'activité agricole devient non rentable sur 25% de la SAU durant le dixième pas de temps. Par conséquent, l'érosion conduit à l'abandon d'une partie non négligeable des terres disponibles.

Figure 5 : Evolution des superficies par système (ha)



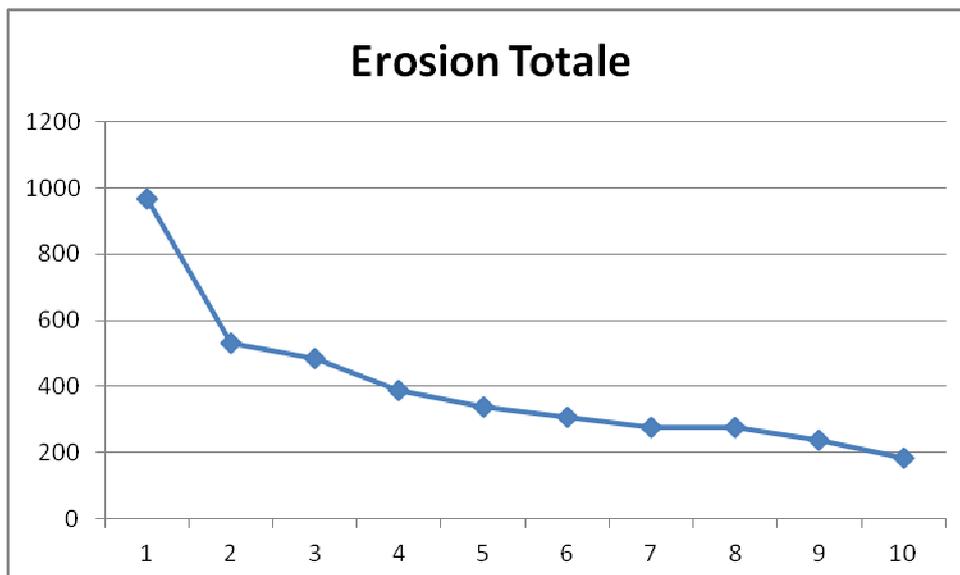
En observant les paramètres de sortie du modèle, nous constatons une baisse importante de la valeur de la fonction objectif de 14517.7 pendant le premier pas de temps pour atteindre une valeur de 3853.7 pendant le dixième pas de temps. Cette baisse d'utilité et de revenu est due à la perte des rendements associés à la perte du sol pour les deux systèmes. Nous pensons que la baisse du revenu enregistré aurait pu être plus importante si l'agriculteur n'avait pas la possibilité d'adopter un système de conservation.

Figure 6 : Evolution de la valeur de l'utilité de l'agriculteur (sans aucune intervention publique)



La prise de conscience de la présence du problème de dégradation du sol se traduit par le choix d'un assolement pour chaque pas de temps qui permet de diminuer les niveaux d'érosion. En effet, le niveau d'érosion totale de l'exploitation passe de 966.58 tonnes par campagne pendant le premier pas de temps à 182.61 tonnes à la fin de l'horizon de planification. Bien entendu, cette baisse du niveau d'érosion à l'échelle de l'exploitation n'est pas le résultat de l'adoption d'un système de conservation uniquement, mais elle traduit aussi l'épuisement de la profondeur du sol avant de se transformer en une terre non convenable à l'activité agricole.

Figure 7 : Erosion totale de l'exploitation en tonnes (sans aucune intervention)



Le tableau suivant récapitule les résultats de ce premier modèle du point de vue économique et production jointe :

Tableau 5 : Résultats de l'exploitation en absence d'intervention publique

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
X conv	104,5	104,5	92	63,04	32,01	23,1	13,72	11,64	7,51	3,57
X cons	5,5	5,5	18	46,96	77,99	86,9	96,28	98,36	90,87	77,91
Revenu	44753,3	40457,3	39630,9	38743,1	36649,4	35080,1	34219,5	34826,3	32838,6	29576,4
Utilité	14517,7	12971,4	11395,5	9895,78	8680,6	7635,99	6599,56	5581,4	4567,61	3853,75
E globale	966,58	529,21	483,63	388,06	338,57	305,93	275,52	276,97	238,83	182,61
Erosion/ha	8,79	4,81	4,4	3,53	3,08	2,78	2,5	2,52	2,43	2,24

L'introduction de la récursivité nous a permis de donner un caractère dynamique au modèle. En supposant une technologie constante, nous pouvons nettement affirmer que l'absence d'une intervention publique permettant d'atténuer l'érosion des sols conduit à une chute considérable des revenus des agriculteurs ainsi qu'elle conduit à un niveau de qualité de sol non convenable à l'activité agricole.

Dans ce qui suit, nous allons essayer d'introduire un instrument classique de politique agricole (une taxe et une subvention) afin d'essayer de garantir une utilisation durable des terres agricoles.

2. Modèle avec une taxe sur l'adoption d'un système conventionnel

Dans un premier temps, nous avons introduit une taxe sur l'adoption d'un système conventionnel. C'est un moyen de pénaliser ce système afin de pousser l'agriculteur à adopter un système de conservation. Les superficies menées sous un système conventionnel seront taxées. Afin d'éviter la complexification du modèle, nous avons opté pour faire une sorte de paramétrage afin de déterminer la valeur de la taxe qui pourrait être convenable. A chaque fois, on a fait tourner le modèle tout en faisant varier la valeur de la taxe entre 10 et 50 euros. Nous avons retenu une valeur de la taxe égale à 20 euros.

Les résultats trouvés montrent qu'en présence d'une telle taxe, nous pouvons enregistrer un passage plus rapide vers l'adoption d'un système de conservation pour toutes les activités.

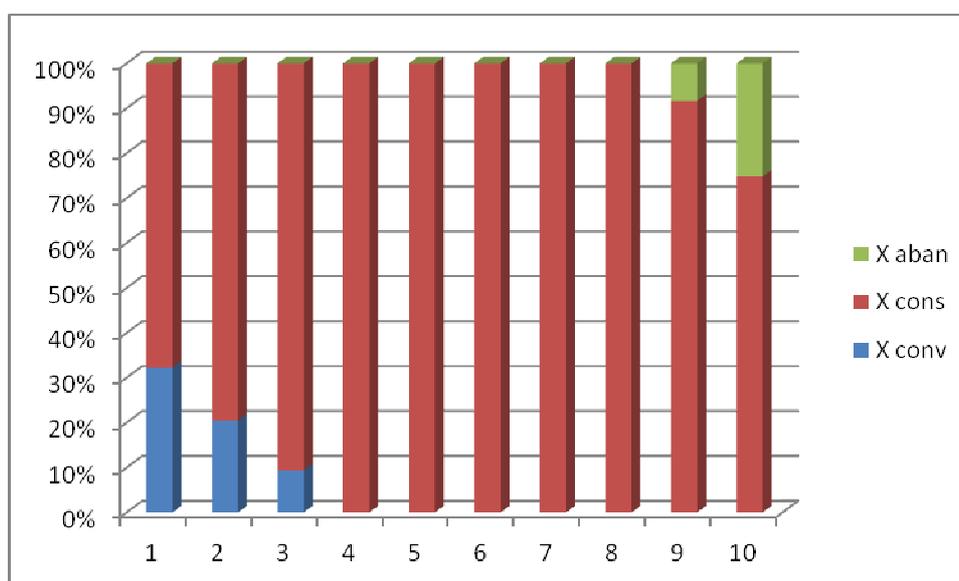
Tableau 6 : Evolution des superficies par culture et par système en ha (avec une taxe)

Culture	Système	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
BT	cons	23,9	22,4	24,4	25,1	24	25,3	26,4	27,7	26,8	22,7
	conv	12,9									
Maïs	cons		13,4	13,9	14,9	14,3	15,2	16,1	17,1	16,6	13,8
	conv	22,5	22,5	10,3							
TS	cons			12,1	23,4	22,3	23,8	25,3	27,0	26,9	24,6
	conv	17,4	15,8	12,1	11,0	7,42	6,29	4,48	2,41	0,59	0,37
Soja	cons	12	12	12	8,70	14,6	13,1	11,6	9,9	10	12,3
Orge	cons	10	12,6	13,9	15,8	16,2	15	14,9	14,7	9,62	
Jachère	cons	11	11	11	11	11	11	11	11	10,1	8,2
Total		110	100	82.2							

A l'exception des cultures du blé dur et du maïs, l'agriculteur entreprend un système de conservation pour toutes les autres cultures à partir du premier pas de temps. Ce maintien du système conventionnel pour ces deux cultures s'explique par le fait qu'il s'agit de cultures à rendement assez important en plus de leur prix intéressant par rapport au blé tendre qui lui aussi présente des rendements importants. Ainsi, il semble qu'il soit rentable de payer une taxe et utiliser un système conventionnel qui coûte moins cher. Avec la baisse progressive des rendements en raison de l'érosion et la présence de la taxe, on note l'abandon total du recours au système de conservation à partir du troisième pas de temps.

Par ailleurs, il s'est avéré que la présence d'une taxe sur le système conventionnel n'a pas donné lieu à une bonne valorisation de l'importance de la lutte contre l'érosion. En effet, on note toujours l'abandon d'une partie non négligeable de la SAU de l'ordre de 27 ha pendant le dixième pas de temps.

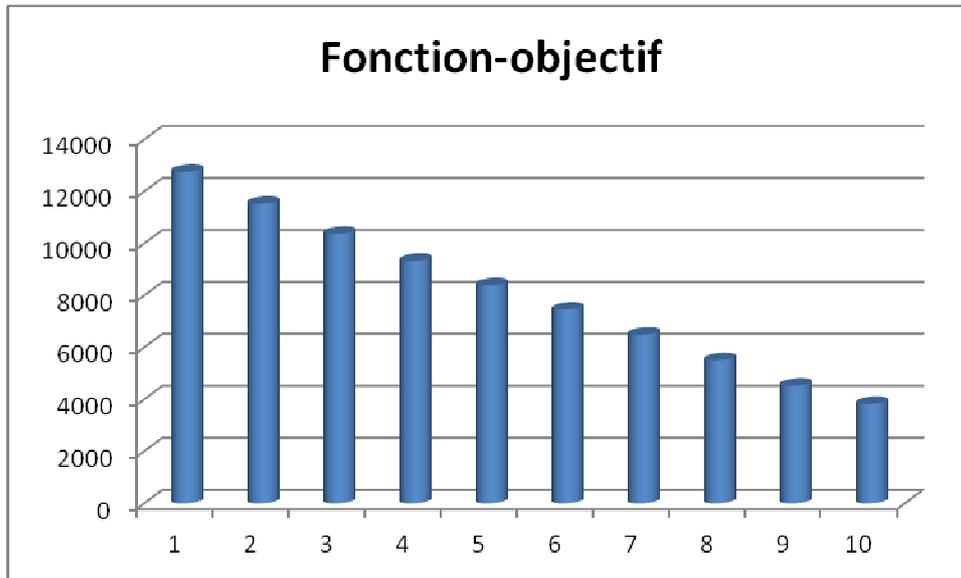
Figure 8 : Evolution des superficies par système en ha (avec taxe)



En observant les paramètres de sortie du modèle, nous constatons une baisse de la valeur de la fonction objectif semblable à celle enregistrée dans le cas d'absence de toute intervention publique, de 12752.45 pendant le premier pas de temps pour atteindre une valeur de 3819.44 pendant le dixième pas de temps. Cette baisse d'utilité et de revenu est due à la perte des rendements associés à la perte du sol pour les deux

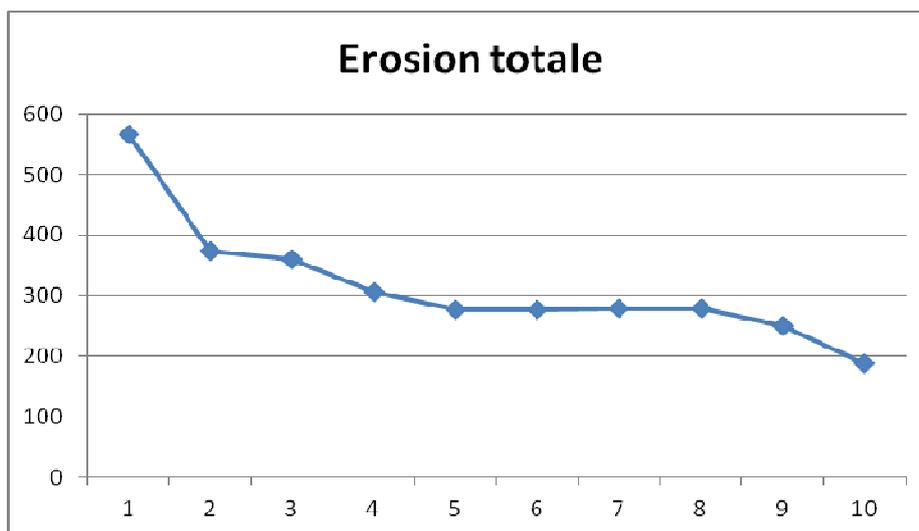
systemes en plus de la taxe payée pendant les deux premiers pas de temps, ce qui crée une charge de plus pour l'agriculteur.

Figure 9 : Evolution de la valeur de l'utilité de l'agriculteur (Taxe)



En ce qui concerne la production jointe, la mise en place de la taxe a permis de réduire le niveau d'érosion totale de l'exploitation par rapport à la situation initiale et surtout pendant les deux premiers pas de temps. En effet, le niveau d'érosion à l'échelle de l'exploitation passe de 567.07 tonnes par campagne pendant le premier pas de temps à 187.36 tonnes à la fin de l'horizon de planification. L'épuisement de la qualité du sol qui a conduit à l'abandon de presque 25% de la SAU s'explique par le niveau relativement élevé de l'érosion produite surtout au cours du premier pas de temps.

Figure 10 : Erosion totale de l'exploitation en tonnes (Taxe)



Le tableau suivant récapitule les résultats de ce deuxième modèle :

Tableau 7 : Résultats de l'exploitation en présence d'une taxe sur l'adoption du système conventionnel

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
X conv	35,47	22,57	10,35	0	0	0	0	0	0	0
X cons	74,53	87,43	99,65	110	110	110	110	110	100,82	82,26
Revenu	39353,7	38226,3	36984,8	36985,2	34853,9	35571	36197,7	37046,3	35719,4	31856,2
Utilité	12752,4	11529,2	10365,5	9327,1	8384,8	7444,3	6480,3	5499,4	4519,2	3819,4
E globale	567,07	374,2	360,86	305,5	276,91	276,5	277,9	279,65	249,86	187,36
Erosion/ha	5,16	3,4	3,28	2,78	2,52	2,51	2,53	2,54	2,48	2,28

En présence d'une taxe sur le système conventionnel, le niveau d'érosion globale de l'exploitation baisse par rapport à la situation initiale. Toutefois, l'effort déployé pour garantir une utilisation durable des sols et un niveau d'utilité convenable pour l'agriculteur reste insuffisant.

Dans ce qui suit, nous remplacerons la taxe sur le système conventionnel par une subvention afin d'encourager le recours au système de conservation.

3. Modèle avec une subvention sur l'adoption d'un système de conservation

Dans cette partie, nous avons introduit une subvention pour promouvoir l'adoption d'un système de conservation. Afin de pouvoir attribuer une valeur optimale à la subvention, nous avons agi de la même façon que dans le cas de la détermination de la taxe. Le paramétrage nous a conduits à retenir une valeur de la subvention de l'ordre de 40 euros.

Les résultats trouvés montrent qu'en présence d'une telle subvention, nous enregistrons encore un passage rapide vers l'adoption d'un système de conservation pour toutes les activités.

Tableau 8 : Evolution des superficies par culture et par système en ha (avec une subvention)

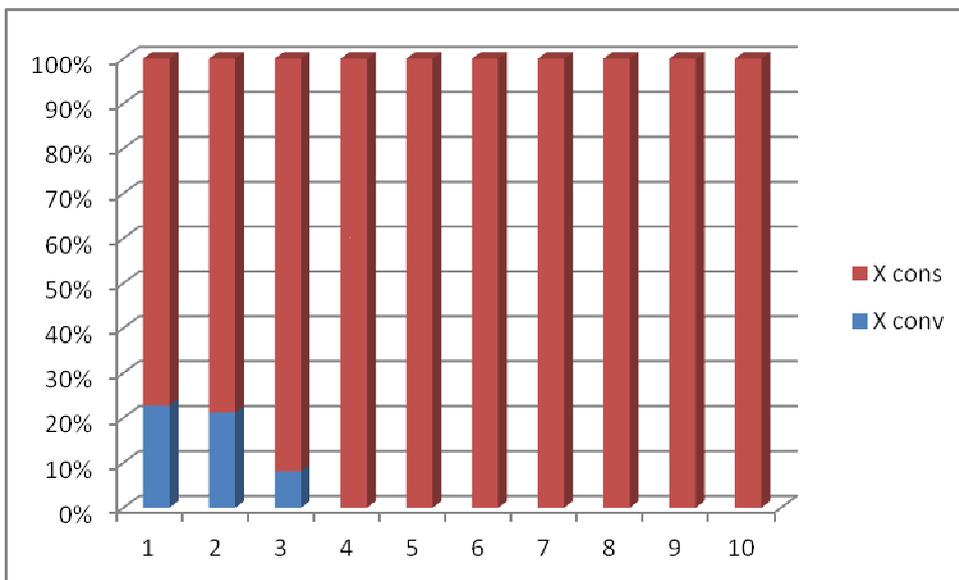
Culture	Système	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
BT	cons	26,9	23,27	25,22	25,79	26,05	23,79	23,97	24,37	25,24	24,02
	conv										
BD	cons	12,01	12,11	12,13	12,66	13,18	12,64	13,00	13,49	14,17	13,51
	conv										
Maïs	conv	25,0	23,3	8,9							
	cons			14,1	23,44	23,45	21,94	22,20	22,73	23,71	23,07
TS	cons	18,2	16,07	14,12	12,61	10,43	8,06	7,66	6,96	6,16	5,08
	conv										
Soja	cons	12,0	12,00	12,00	12,00	13,31	15,06	14,80	14,27	13,29	13,93
	conv										
Orge	cons	4,85	12,20	12,50	12,50	12,59	17,51	17,37	17,19	16,43	11,91
	conv										
Jachère	cons	11,0	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	18,48
	conv										
Total		110									

A l'exception de la culture du maïs, l'agriculteur entreprend un système de conservation pour toutes les autres cultures à partir du premier pas de temps. Pour la même raison citée précédemment, il semble qu'il est plus bénéfique pour l'agriculteur de pratiquer la culture du maïs sous un système conventionnel et sans l'obtention de la subvention. Au fur et à mesure que l'effet de l'érosion devient plus important, l'agriculteur se retrouve obligé d'entreprendre toutes les activités productives avec un système de conservation.

Par contre, il s'est avéré que la présence d'une subvention sur le système de conservation est capable de conduire à une bonne valorisation de l'importance de la lutte contre l'érosion. En effet, l'agriculteur arrive à conserver l'intégralité de sa SAU sur les 10 pas de temps. Ce constat nous ramène à dire que le

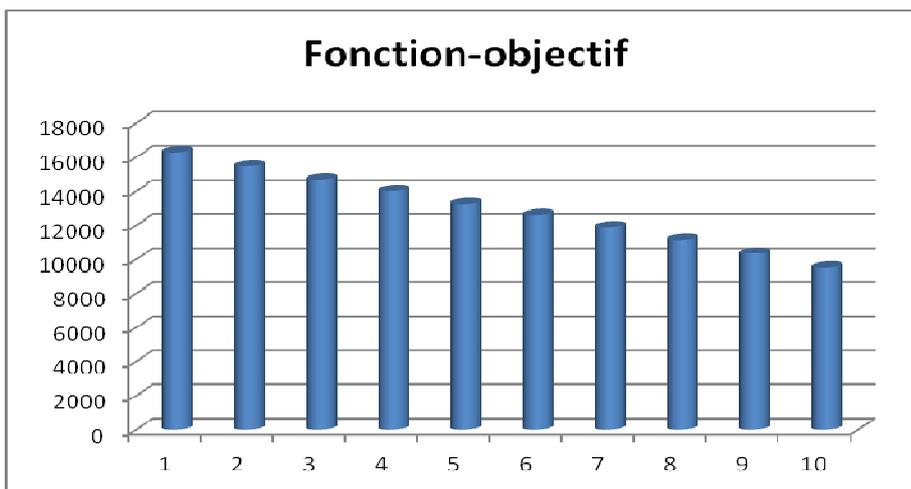
recours à l'encouragement des agriculteurs moyennant une subvention peut à priori garantir une utilisation durable des terres agricoles.

Figure 11 : Evolution des superficies par système en ha (avec subvention)



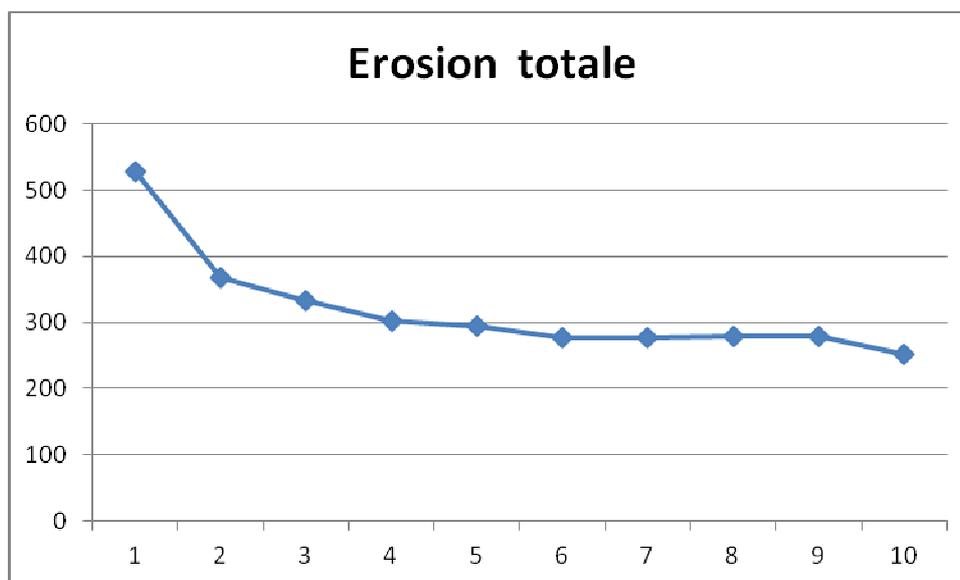
En observant les paramètres de sortie du modèle, nous constatons une augmentation de la valeur de la fonction objectif par rapport à celle enregistrée dans le cas d'absence de toute intervention publique mais ça n'empêche pas la valeur de l'utilité de l'agriculteur d'évoluer dans un sens négatif. En effet, cette dernière passe de 16280.9 pendant le premier pas de temps pour atteindre une valeur de 9517.35 pendant le dixième pas de temps. Cette baisse d'utilité et de revenu est moins importante que celles des deux premiers scénarios. De plus, nous estimons que la présence d'un correctif technologique, supposé constant dans notre étude, peut permettre de stabiliser le niveau d'utilité de l'agriculteur. Il est notable que cette augmentation de la valeur initiale de l'utilité est due aussi à la subvention reçue par l'agriculteur.

Figure 12 : Evolution de la valeur de l'utilité de l'agriculteur (Subvention)



En ce qui concerne la production jointe, la mise en place de la subvention a permis de réduire le niveau d'érosion totale de l'exploitation par rapport à la situation initiale ainsi qu'à la situation avec la taxe. En effet, le niveau d'érosion à l'échelle de l'exploitation passe de 528.66 tonnes par campagne pendant le premier pas de temps à 250.92 tonnes à la fin de l'horizon de planification. Ces niveaux d'érosion permettent de conserver la qualité de la totalité de la SAU.

Figure 13 : Erosion totale de l'exploitation en tonnes (Subvention)



Le tableau suivant récapitule les résultats de ce troisième modèle de point de vue économique et production jointe :

Tableau 9 : Résultats de l'exploitation en présence d'une subvention

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
X conv	25	23,35	8,91	0	0	0	0	0	0	0
X cons	85	86,65	101,09	110	110	110	110	110	110	110
Revenu	45327,6	42589,2	41437,7	41098,7	40333	37863,9	37428,9	37235,3	37481,4	35814
Utilité	16280,9	15452,3	14691,9	13998,8	13275,2	12587,4	11881,1	11127,6	10331,5	9517,35
E globale	528,66	367,15	332,26	302,17	294,03	277,67	277,9	278,36	278,18	250,92
Erosion/ha	4,81	3,34	3,02	2,75	2,67	2,52	2,53	2,53	2,53	2,28

En présence d'une subvention sur le système conventionnel, le niveau d'érosion globale de l'exploitation baisse considérablement par rapport à la situation initiale. Cet instrument de politique permet de garantir une utilisation durable des sols sur tout l'horizon de planification.

Dans ce qui suit, nous allons tester l'effet de l'introduction simultanée d'une taxe sur le système conventionnel et d'une subvention sur le système de conservation.

4. Modèle avec subvention et taxe

Dans cette dernière exécution du modèle, nous avons repris les deux valeurs retenues de la taxe ainsi que de la subvention. Ensuite, nous avons tourné le modèle en présence de ces deux instruments de politique.

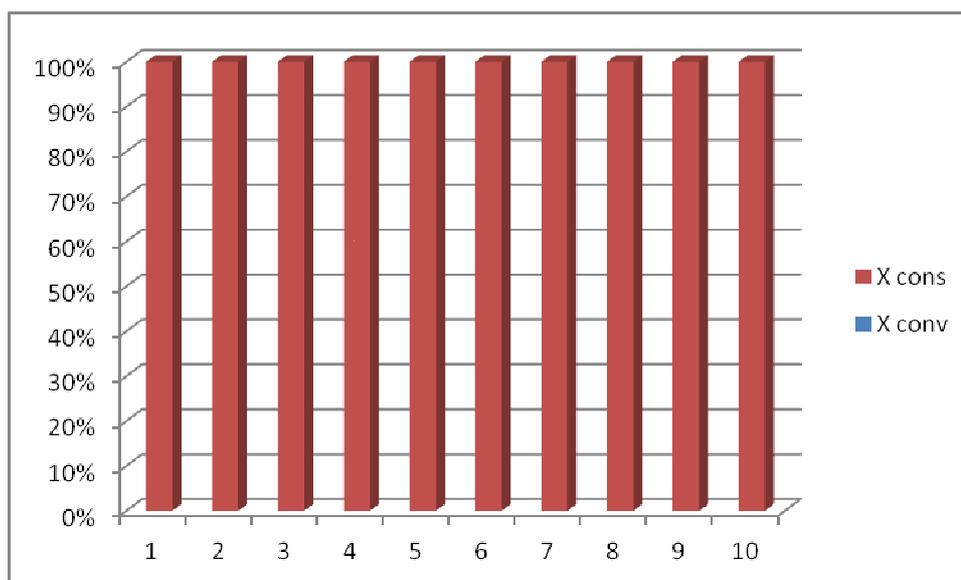
Les résultats trouvés montrent qu'en présence d'une taxe sur le système conventionnel en plus d'une subvention sur le système de conservation, l'agriculteur élimine complètement le système conventionnel et pratique des activités basées sur un système de conservation.

Tableau 10 : Evolution des superficies par culture et par système en ha (avec taxe et subvention)

Culture	Système	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
BT	cons	27,41	25,10	25,31	25,79	26,05	23,79	23,97	24,37	25,24	24,02
	conv										
BD	cons	11,80	11,48	11,95	12,66	13,18	12,64	13,00	13,49	14,17	13,51
	conv										
Maïs	cons	25,00	23,38	23,19	23,44	23,45	21,94	22,20	22,73	23,71	23,07
	conv										
TS	cons	18,57	15,43	14,05	12,61	10,43	8,06	7,66	6,96	6,16	5,08
	conv										
Soja	cons	12,00	12,00	12,00	12,00	13,31	15,06	14,80	14,27	13,29	13,93
	conv										
Orge	cons	4,22	11,62	12,50	12,50	12,59	17,51	17,37	17,19	16,43	11,91
	conv										
Jachère	cons	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	11,00	18,48
	conv										
Total		110									

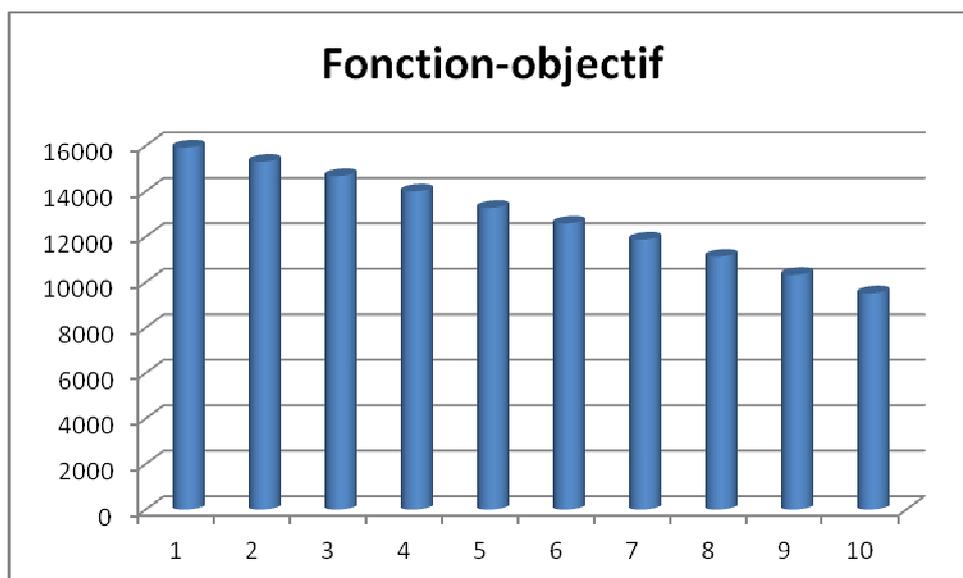
Il est notable que dans cette situation, l'agriculteur commence à utiliser un système de conservation sur la totalité de ses terres. Ce système de taxe-subsidation favorise l'atténuation de l'érosion dès le premier pas de temps. L'agriculteur peut donc se contenter de préserver la totalité de ses terres. Ce constat nous ramène à dire que le recours à l'encouragement des agriculteurs moyennant une subvention et leur pénalisation par une taxe garantit une utilisation durable de leurs sols. L'agriculteur se trouve obligé de réviser sa préférence pour le présent.

Figure 14 : Evolution des superficies par système en ha (avec taxe et subvention)



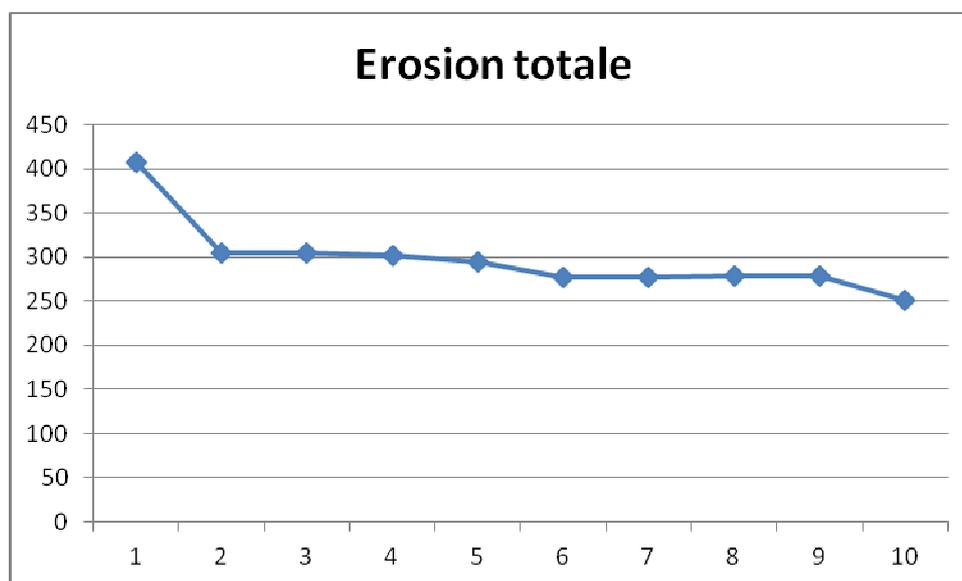
En observant les paramètres de sortie du modèle, nous constatons que la valeur de la fonction objectif enregistrée est très semblable à celle enregistrée dans le cas de la présence d'une subvention sur le système de conservation. Ceci s'explique par le fait que l'agriculteur n'a pas choisi d'adopter un système conventionnel. En effet, la valeur de l'utilité passe de 15932.48 pendant le premier pas de temps pour atteindre une valeur de 9517.35 pendant le dixième pas de temps. Cette baisse d'utilité et de revenu est moins importante que celles des trois premiers scénarios.

Figure 15 : Evolution de la valeur de l'utilité de l'agriculteur (Taxe et subvention)



En ce qui concerne la production jointe, la mise en place d'un système de taxe- subvention a permis de réduire le niveau d'érosion totale de l'exploitation par rapport à toutes les situations précédemment traitées. En effet, le niveau d'érosion à l'échelle de l'exploitation passe de 407.58 tonnes par campagne pendant le premier pas de temps à 250.92 tonnes à la fin de l'horizon de planification. Ces niveaux d'érosion permettent de conserver la qualité de la totalité de la SAU.

Figure 16 : Erosion totale de l'exploitation en tonnes (Taxe et subvention)



Le tableau suivant récapitule les résultats de ce quatrième modèle du point de vue économique et production jointe :

Tableau 11 : Résultats de l'exploitation en présence d'une taxe et une subvention

	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
X cons	110	110	110	110	110	110	110	110	110	110
Revenu	45348,4	42536,8	41581,9	41098,7	40333	37863,9	37428,8	37235,3	37481,4	35814
Utilité	15932,4	15307,6	14678,9	13998,7	13275,1	12587,3	11881	11127,6	10331,5	9517,3
E globale	407,5	304,04	304,74	302,17	294,03	277,67	277,9	278,36	278,18	250,92
Erosion/ha	3,71	2,76	2,77	2,75	2,67	2,52	2,53	2,53	2,53	2,28

VI. Comparaison des résultats

Dans cette partie, on s'intéressera à comparer les résultats de la partie précédente afin de pouvoir mettre le point sur la situation qui conduit à un niveau acceptable de bien-être de l'agriculteur tout en favorisant une utilisation durable des terres agricoles.

Dans un premier temps, nous essayerons de comparer les résultats en termes d'utilité : quelle est la situation qui fournit le meilleur niveau d'utilité ? Ensuite, nous comparerons les résultats en termes de production jointe : quelle est la situation qui crée moins d'érosion ?

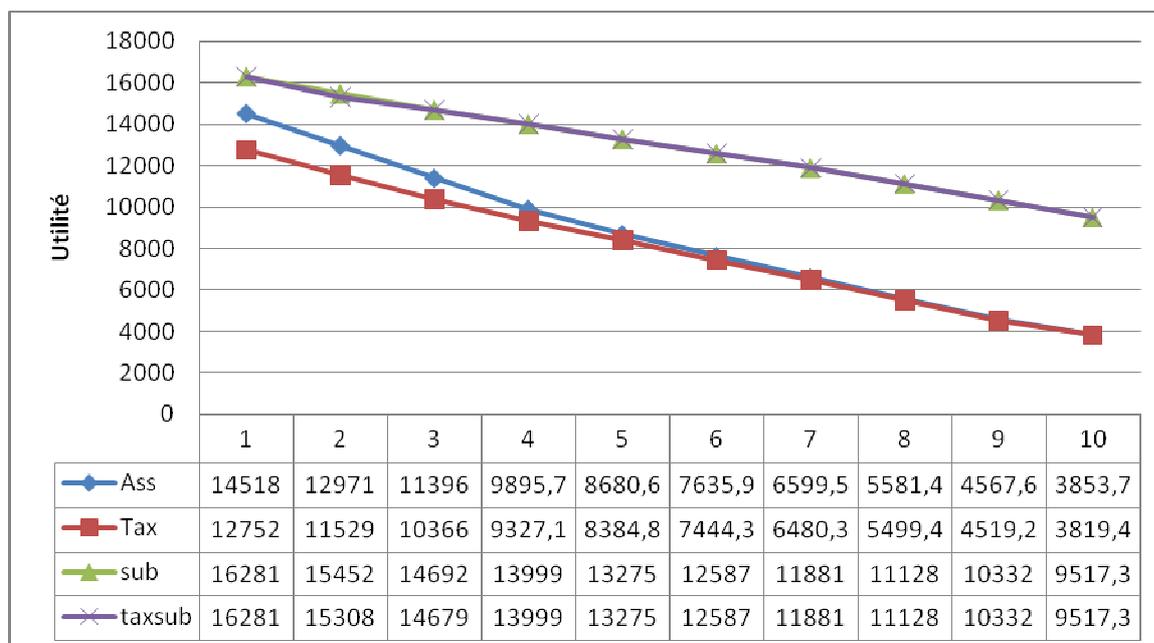
1. Comparaison des niveaux d'utilité

L'utilité de l'agriculteur est en étroite relation avec la qualité de son sol. La conservation de la terre agricole conduit à stabiliser le niveau des rendements et donc le niveau du revenu.

La figure suivante renseigne sur le niveau d'utilité de l'agriculteur dans les 4 situations précédemment traitées :

- situation sans aucune intervention publique ;
- présence d'une taxe sur le système conventionnel ;
- présence d'une subvention sur le système de conservation ;
- présence d'une taxe et une subvention en même temps

Figure 17 : Comparaison entre les différents niveaux d'utilité



En observant la figure ci-dessus, on constate une tendance décroissante pour toutes les courbes relatives aux différentes situations : quelle que soit la situation dans laquelle l'agriculteur se retrouve, la chute de l'utilité d'un pas de temps à un autre semble inévitable.

En partant de la situation initiale où aucune intervention publique n'a été prévue, seule la présence d'une taxe sur l'adoption du système génère un niveau d'utilité initial plus bas. Vers le cinquième pas de temps, les niveaux d'utilité simulés dans la situation initiale et la situation avec une taxe se croisent. Ainsi, nous pouvons confirmer que l'introduction d'une taxe sur l'adoption du système conventionnel n'est pas convenable pour l'agriculteur.

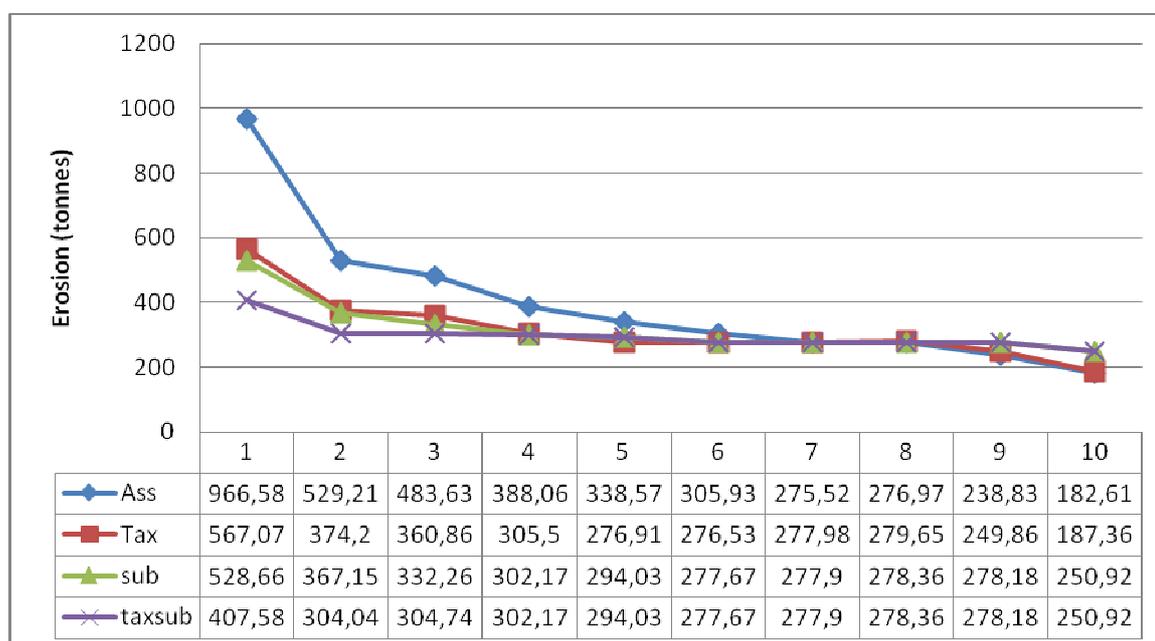
En contrepartie, nous remarquons que l'introduction d'une subvention sur le système de conservation ainsi que le recours à un système de taxe-subvention conduisent un niveau de bien-être initial plus important. De plus, la baisse de l'utilité au cours du temps est moins importante que dans les deux premiers cas. Les courbes d'évolution de l'utilité sont presque totalement confondues parce que l'agriculteur choisit de ne pas payer la taxe ce qui fait qu'il se retrouve dans une situation où il reçoit une subvention sans payer de taxe. Donc, le système de taxe-subvention et l'introduction d'une subvention sur le système de conservation s'annoncent comme deux alternatives permettant une stabilisation meilleure du niveau de bien-être de l'agriculteur.

2. Comparaison des niveaux d'érosion

La conservation du sol et sa prévention contre l'érosion est une action déterminante pour garantir la durabilité de l'utilisation des terres agricoles. De plus, la lutte contre l'érosion permet de stabiliser les rendements des produits agricoles et donc les revenus.

La figure suivante renseigne sur le niveau d'érosion globale de l'exploitation dans les 4 situations précédemment citées :

Figure 18 : Comparaison entre les différents niveaux d'externalité



En observant la figure ci-dessus, on remarque que l'érosion globale de l'exploitation représente une tendance décroissante pour toutes les courbes relatives aux différentes situations : quelle que soit la situation dans laquelle l'agriculteur se retrouve, le niveau d'érosion produit par son exploitation baisse d'un pas de temps à un autre. A l'exception de la situation initiale et de la situation avec la taxe, le niveau d'érosion commence à se stabiliser à partir du sixième pas de temps.

En partant de la situation initiale où aucune intervention publique n'a été prévue, toutes les interventions prévues permettent de rabaisser le niveau d'érosion surtout au cours du premier pas de temps.

L'introduction de la taxe sur le système conventionnel et l'introduction de la subvention sur le système de conservation produisent un niveau d'érosion presque équivalent sur tout l'horizon de la planification à l'exception du premier pas de temps. Toutefois, il ne faut pas oublier que la taxe conduit à l'abandon d'une partie de la SAU. Ce constat nous ramène à confirmer que la lutte contre l'érosion doit démarrer dès le premier pas de temps. Le taux de préférence de l'agriculteur pour le présent doit donc être faible. De ce point de vue, le système de taxe-subvention s'annonce comme l'issue la plus capable de réduire le niveau d'érosion surtout au cours du premier pas de temps.

A travers ces comparaisons, les deux alternatives convenables pour une utilisation durable des terres agricoles sont le système de taxe-subvention et la situation avec l'introduction d'une subvention sur le système de conservation. La détermination de la politique la plus efficace reste difficile. C'est d'ailleurs pour cette raison que nous nous proposons d'établir une petite analyse coût efficacité.

3. Analyse coût efficacité

En considérant que notre objectif est d'empêcher l'occurrence d'un abandon des terres agricoles sur tout l'horizon de planification (100 années), nous nous intéresserons à calculer le coût social dépensé pour réaliser cet objectif et ce dans les deux situations que nous souhaitons comparer.

Nous avons calculé le coût de la conservation du sol dans le cas de la présence d'une subvention sur le système de conservation ainsi que dans le cas de la présence d'un système de taxe-subvention. Bien entendu, le calcul est fait sur tout l'horizon de planification.

Tableau 12 : Estimation du coût social

Instrument	Subvention allouée €	Taxe collectée	Coût social €	Erosion (tn)
Subvention	397876	0	397876	31873
Tax- Subv	440000	0	440000	29755

On note que le coût dépensé dans le cadre de l'instauration d'une taxe sur le système conventionnel ainsi qu'une subvention sur le système de conservation est plus élevé que celui dépensé dans le cadre d'une introduction d'une subvention uniquement. La différence de coût est de l'ordre de 42 124 euros sur 100 années. Cependant, cette différence de coût s'est traduite par une minimisation plus importante de l'érosion. Lorsqu'on dépense plus, on arrive à générer moins d'érosion. En effet, la différence entre les niveaux de l'érosion pour les deux politiques est de l'ordre de 2 118 tonnes sur les 100 années. Cette perte du sol représente presque le niveau d'érosion d'un pas de temps (211 tonnes par an). Or, nous savons que la subvention distribuée à l'agriculteur coûte 44 000 euros. Par conséquent, nous pouvons dire que le recours à une politique du genre taxe-subvention permet d'économiser une perte de sol qui peut être cumulable sur 10 années pour un coût moins élevé.

Sur la base de cette petite analyse, la politique la plus efficace en matière de conservation du sol est celle basée sur l'introduction d'une taxe sur le système conventionnel et d'une subvention sur le système de conservation en même temps.

4. Discussion des résultats

Les résultats trouvés dans le cadre cette étude montrent que la qualité du sol joue un rôle important dans la stabilisation des rendements et donc des revenus agricoles à long terme. En absence présence de pratiques inappropriées, représentées par le système conventionnel dans notre cas, l'agriculteur se rend compte de l'ampleur du problème de dégradation de ses terres avec un certain déphasage. En effet, il ne

commence l'investissement sur la qualité de son sol qu'au moment où l'activité basée sur un système conventionnel devient non rentable. Il n'accepte pas de voir ses coûts de production augmenter afin de conserver son sol. Entre temps la dégradation de la qualité du sol, malheureusement irréversible si on traite un problème comme celui de l'érosion, s'accumule et sa restauration devient de plus en plus difficile au cours du temps. D'ailleurs même si l'agriculteur migre vers l'adoption d'un système de conservation basé sur des pratiques de labour minimal au bout d'un certain temps, il peut se retrouver dans des situations où il abandonne des parties relativement importantes de ses terres. Par conséquent, il s'est avéré qu'une intervention publique sous forme d'une taxe sur l'utilisation d'un système conventionnel et d'une subvention pour encourager l'adoption d'un système de conservation est indispensable pour une utilisation durable des terres agricoles.

Cependant, les résultats montrent qu'en aucun cas nous ne pouvons améliorer ou conserver le même niveau de revenu à long terme. L'intensité de la baisse des revenus varie d'une situation à une autre. La présence d'un instrument de politique tel que le système taxe-subvention semble capable d'atténuer au mieux cette baisse des revenus, due principalement à la chute des rendements suite à la dégradation de la qualité du sol.

Ainsi, pour éviter les conséquences néfastes d'un processus de dégradation du sol comme l'érosion, l'investissement sur la conservation du sol est impératif et doit rentrer dans les pratiques de l'agriculteur avant de constater la dégradation de ses terres.

Comme nous nous sommes limités à utiliser un système de conservation basé sur un entretien minimal des terres, nous pensons qu'il sera utile de tester l'effet d'autres pratiques agricoles qui peuvent être plus efficaces dans la lutte contre l'érosion comme l'implantation des bandes enherbées, la construction des barrières antiérosives, l'apport de matière organique, les cultures intercalaires etc. De telles pratiques peuvent conduire à une stabilisation meilleure des revenus voire à leur amélioration.

Ce travail a permis d'aborder le problème de l'érosion du sol d'une manière qui se rapproche de la réalité. L'introduction de la récursivité permet donc à l'agriculteur de modifier ses choix en matière d'allocation de ressources et d'assolement à pratiquer en fonction de l'état de la qualité de son sol. Une telle méthodologie semble compléter les travaux menés dans un cadre statique.

Conclusion générale

Le monde est en train de subir des changements sur tous les plans économique et environnemental ce qui renvoie à l'agriculture un rôle décisif dans la garantie de la pérennité de la vie humaine. Toutefois, l'épuisement des ressources naturelles en quantité et en qualité telles que les sols menace le développement durable de l'agriculture.

L'Europe n'est pas exempte de cette conjoncture et s'avère directement affectée par la dégradation de la qualité des sols qui se manifeste par divers processus comme l'érosion et le déclin des teneurs en matière organique. Les répercussions de ces processus dont la fréquence ne cesse d'augmenter durant les dernières décennies sont néfastes pour les différents secteurs et surtout pour l'agriculture.

Le présent travail montre qu'il existe une différenciation entre la qualité et la fertilité du sol et que sa dégradation dépend de l'activité de production et non pas du produit. Il confirme aussi la vulnérabilité des terres agricoles européennes, qualifiées de déterminantes dans la sécurité alimentaire et dans la régulation de l'environnement, aux processus de dégradation des sols. Même si la situation devient de plus en plus alarmante, nous n'avons pas relevé de mesures qui luttent explicitement contre ce problème.

Dans un essai pour mieux comprendre le comportement des agriculteurs face à une dégradation de la qualité de leurs sols, on a élaboré un modèle bioéconomique récursif où on a analysé l'effet des pratiques agricoles sur les rendements et les revenus agricoles ainsi que sur la durabilité de l'utilisation des terres agricoles.

A travers la démarche méthodologique proposée et sur la base d'un méta modèle permettant de quantifier l'effet des pratiques agricoles sur la qualité du sol et sur les rendements, nous avons pu prouver qu'un processus de dégradation irréversible des sols tel que l'érosion, représente une grande menace pour la subsistance de l'activité agricole sur le long terme. L'introduction de la récursivité a donné un caractère dynamique au modèle, elle nous a permis d'analyser le changement du comportement de l'agriculteur en fonction de l'état de son sol.

Si nous traitons le sol comme une ressource non renouvelable sur une centaine d'année (ressource lentement renouvelable), la baisse des rendements en raison de la perte de la profondeur du sol est inévitable. Le recours à des pratiques de labour réduit permet d'atténuer la baisse de ces rendements. D'ailleurs les résultats générés par le modèle montrent que si l'agriculteur a recours à un système de conservation, il enregistre une chute moins importante du revenu et il arrive à mieux conserver son sol.

Le présent travail a montré que la mise en place d'un instrument de politique agricole sous forme d'une taxe sur l'adoption d'un système conventionnel et d'une subvention pour l'adoption d'un système de conservation est essentielle pour garantir une utilisation durable des terres agricoles ainsi que pour réduire la variabilité des revenus. Ainsi, il sera bénéfique d'élargir la carte des exploitations agricoles ayant recours à un travail réduit, tel que l'agriculture biologique et l'agriculture de conservation.

L'introduction de cette notion de qualité des sols dans les politiques régionales ne pourrait qu'améliorer la gestion des sols et par la suite stabiliser la production agricole et renforcer l'économie européenne. Il semble que l'encouragement des investissements sur la qualité des sols est capable d'atténuer la vulnérabilité de ces derniers aux différentes menaces de dégradation. Cette question de vulnérabilité à la dégradation nécessite des efforts considérables à déployer sur le niveau institutionnel, technique et économique. Elle mérite d'être toujours révisée vu qu'il s'agit d'un problème dynamique.

Ce travail a permis de mieux comprendre le problème de dégradation de la qualité des sols en Europe et de mettre l'accent sur la nécessité d'entreprendre des activités de conservation des sols pour garantir une utilisation durable des terres agricoles.

Bibliographie

- AEE (Agence Européenne pour l'Environnement, Copenhague). 2010.** *Le sol : une ressource oubliée*. [Consulté en 2010]. <http://www.eea.europa.eu/fr/articles/le-sol>
- Agreste. 2009.** La statistique, l'évaluation et la prospective agricole [site web]. [Consulté en 2009]. <http://www.agreste.agriculture.gouv.fr/>
- Arshad M. A., Martin S. 2002.** Identifying critical limits for soil indicators in agro-ecosystem. *Agriculture, Ecosystems and environment*, vol. 88, p. 153-160.
- Barbier B. 1998.** Induced innovation and land degradation: Results from a bioeconomic model of a village in West Africa. *Agricultural Economics*, vol. 19, p 15-25.
- Baumgärtner S., Dyckhoff H., Faber M., Proops J., Schiller J. 2001.** The concept of joint production and ecological economics. *Ecological Economics*, vol. 36, p. 365-372.
- Baumgärtner S., Faber M., Proops J. 2002.** How environmental concern influences the investment decision: an application of capital theory. *Ecological Economics*, vol. 40, p. 1-12.
- 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 science du sol : ENSAM, 155 p.
- Ben Aoun W. 2010.** Entretien de la qualité du sol par les agriculteurs : étude théorique. Mémoire de Master 2 : Cohabitation IAMM, Université Montpellier 1 et Montpellier Supagro, 49 p.
- Blanco Fonseca M., Flichman G., Belhouchette H. 2011.** Dynamic optimization problems: different resolution methods regarding agriculture and natural resource economics. In Flichman G. (ed.). *Bio-economic models applied to agricultural systems*. Dordrecht : Springer, p. 29-58.
- Boussard J.-M. 2011.** Bio physical models as detailed engineering production functions. In : Flichman G. (ed.). *Bio-economic models applied to agricultural systems*. Dordrecht : Springer, p. 15-28.
- Brahy V., Loyen S.** L'imperméabilisation et la compaction des sols. In : *L'état de l'environnement wallon : rapport analytique 2006-2007*. Partie 3. Chap. 11 : les sols et l'environnement terrestre. [Consulté en 2010]. http://etat.environnement.wallonie.be/uploads/rapports/parties/chapitres/fiches/SOLS_06.pdf
- Chitrit J. 2006 ?** Fertilité des sols agricoles. Exemples de pratiques agricoles adaptées à partir d'une enquête DELPHI (2 tours : juin 2005, octobre 2006) ou un problème de définition, d'évaluation et de pratiques... 9 p. [Consulté en 2010]. <http://www.farre.org/fileadmin/medias/pdf/chitrit.pdf>
- Clarke H.R. 1992.** The supply of non-degraded agricultural land. *Australian Journal of Agricultural Economics*, vol. 36, p. 31-56.
- Commission Européenne. 2006.** *Stratégie thématique en faveur de la protection des sols. Résumé de l'analyse d'impact [COM(2006)231 final]*. 10 p. [Consulté en 2010]. <http://register.consilium.europa.eu/pdf/fr/06/st13/st13401-ad02.fr06.pdf>
- European Commission, Soco project team. 2009.** *Final report of the project sustainable agriculture and soil conservation. EUR 23820 EN-2009*. Luxembourg : Office for official publications of the European communities. 172 p. (JRC Scientific and technical reports). [Consulté en 2010]. <http://soco.jrc.ec.europa.eu/documents/EUR-23820-web.pdf>
- Féret D. 2002.** Zoom sur l'éco-conditionnalité. *Lettre du RAD*, juillet, n°25. [Consulté en 2011]. <http://www.ruralinfos.org/spip.php?article469>
- Flichman G. 1997.** Bio-economic models integrating agronomic, environmental and economic issues with agricultural use of water. In : Dupuy B. (ed.). *Aspects économiques de la gestion de l'eau dans le*

bassin méditerranéen : actes de l'atelier de Marrakech. Bari : CIHEAM-IAM. p. 327-336. (Options Méditerranéennes : série A, n. 31).

Flichman G., Jacquet F. 2003. Le couplage des modèles agronomiques et économiques : intérêt pour l'analyse des politiques. *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales*, n. 67, p. 52-69.

Flichman G., Louhichi K., Boisson J.M. 2008. Some conceptual issues concerning the way to model the relations between agriculture and environment using bio-economic mathematical programming models. 2èmes journées de recherches en sciences sociales, INRA SFER CIRAD, 11 & 12 décembre 2008, Lille, France.

FAO. 2003. *Economie de l'agriculture de conservation*. Rome : FAO. [Consulté en 2010]. <http://www.fao.org/DOCREP/005/Y2781F/Y2781F00.HTM>

Fox D. et al. 2008. *La dégradation des sols dans le monde*. [Consulté en 2010]. <http://unt.unice.fr/uoh/degsoil/matiere-organique.php>

Jai S., Jai Pal S. 1995. Analysis land degradation and economic sustainability. *Ecological Economics*, vol. 15, p. 77-86.

Janssen S., Van Ittersum M. 2007. *Assessing farmer behavior as affected by policy and technological innovations: bio-economic farm models*. Wageningen University, SEAMLESS integrated project. 86 p. [Consulté en 2010]. <http://ageconsearch.umn.edu/bitstream/9293/1/re070024.pdf>

Hopkins J. W., Lal R., Wiebe K. D., Tweeten L.G. 2001. Dynamic economic management of soil erosion, nutrient depletion and productivity in the north central USA. *Land Degradation and development*, vol. 12, p. 305-318.

Ghali M. A. 2007. Un modèle bioéconomique d'exploitation pour l'analyse de l'éco-conditionnalité et des mesures agrienvironnementales de lutte contre l'érosion : cas du Lauragais. Master of science : CIHEAM-IAMM. 88 p.

Goetz R. U. 1997. Diversification in agricultural production : A dynamic model of optimal cropping to manage soil erosion. *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 79, p. 341-356.

Grepperud S. 1997. Soil conservation as an investment in land. *Journal of Development Economics*, vol. 54, p. 455-467.

Kruseman G., Bade J. 1998. Agrarian policies for sustainable land use: Bio-economic modelling to assess the effectiveness of policy instruments. *Agricultural Systems*, vol. 58, p. 465-481.

LaFrance J. T. 2002. Do increased commodity prices lead to more or less soil degradation ? *Australian Journal of Agricultural Economics*, vol. 36, p. 55-82.

Lefebvre B. La contamination des sols. 11 p. [Consulté en 2010]. http://hydrohane.com/Documents/La_contamination_des_sols.pdf

Louhichi K., Flichman G., Boisson J.M. 2010. Bio-economic modelling of soil erosion externalities and policy options: a Tunisian case study. *J Bioecon*, vol. 12, p. 145-167.

McConnel, Kenneth E. 1983. An economic model of soil conservation. *American Journal of Agricultural Economics*, vol. 65, p. 83-89.

Ministère de l'écologie, du développement durable, des transports et du logement. 2011. Observation et statistique de l'environnement. Le sol. [Consulté en 2011]. <http://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lessentiel/s/sol-1.html>

Mimouni M., Flichman G., Zekri S. 2000. Modelling the trade-off between farm income and reduction of erosion and nitrate pollution. *Annals of Operations Research*, vol. 94, p. 91-103.

Morel H. 1953. Notes sur la conservation des sols aux Etats-Unis. *Revue Forestière Française*, p. 360-384.

OCDE. 2000. *Indicateurs environnementaux pour l'agriculture : méthodes et résultats. Résumé*. Paris : OCDE.

Reeves D.W. 1997. The role of soil organic matter in maintaining soil quality in continuous cropping systems. *Soil & Tillage Research*, vol. 43, p. 131-167.

Timothée O. 2009. Capital naturel, développement et durabilité à Madagascar et au Mozambique. Thèse de doctorat Economie : Université Paris IX Dauphine 1. 274 p.

Tizale C.Y. 2007. The dynamics of soil degradation and incentives for optimal management in the central highlands of Ethiopia. Thesis Phd in Environmental Economics : University of Pretoria. 263 p. [Consulté en 2010]. <http://upetd.up.ac.za/thesis/available/etd-06082007-094341/unrestricted/04back.pdf>

Toth G., Stolbovoy V., Montanarella L. 1990. *Soil quality and sustainability evaluation: an integrated approach to support soil-related policies of the European Union.* 52 p. A JCR position paper. [Consulté en 2011]. http://eusoils.jrc.ec.europa.eu/esdb_archive/eusoils_docs/other/EUR22721.pdf

Van Kooten G. C., Weisenel W. P., Chinthammit D. 1990. Valuing Trade-offs between net returns and stewardship practices : the case of soil conservation in Saskatchewan. *American Agricultural Economics Association*, vol. 72, p. 104-113.

Van Vuuren W. 1986. Soil Erosion : The Case for Market Intervention. *Canadian Journal of Agricultural Economics*, vol. 33, p. 41-62.

Annexes

Annexe 1 : Effets des processus de dégradation des sols sur d'autres processus de dégradation et sur l'environnement

Processus	Erosion	MOS	Compaction	Salinisation	Contamination	Biodiversité
Erosion	X	X	X	X	X	
MOS	X		X		X	X
Compaction	X	X		X	X	X
Salinisation	X	X	X		X	
Contamination						X
Biodiversité	X	X	X		X	

\	Eau	Air	Biodiversité	Paysages
Erosion	X	X	X	X
MOS	X		X	X
Compaction	X		X	X
Salinisation			X	X
Contamination	X	X	X	
Biodiversité	X		X	

Source : European Commission (2009)

Annexe 2 : Quelques valeurs d'érosion par activité simulées par le modèle CROPSYST

C	PC	S	T	Sys	Eros (tn/ha)
BT	TS	s2	t1	conv	7,82
BT	TS	s2	t1	cons	4,28
BD	Orge	s2	t1	conv	7,78
BD	Orge	s2	t1	cons	4,28
Maïs	Maïs	s1	t2	conv	6,83
Maïs	Maïs	s1	t2	cons	4,15
Maïs	Soja	s1	t2	conv	6,83
Maïs	Soja	s1	t2	cons	1,45
TS	Jachère	s1	t1	conv	20,51
TS	Jachère	s1	t1	cons	10,12
Soja	BT	s1	t2	conv	6,71
Soja	BT	s1	t2	cons	1,38
Orge	Jachère	s1	t1	conv	16,4
Orge	Jachère	s1	t1	cons	10,22
Jachère	Jachère	s1	t1	conv	22,31
Jachère	Jachère	s1	t1	cons	13,99
BD	Soja	s1	t1	cons	3,51
BD	Soja	s1	t1	conv	6,68
BT	Soja	s2	t1	conv	7,85
BT	Soja	s2	t1	cons	4,28
BD	TS	s2	t1	conv	7,82
BD	TS	s2	t1	cons	4,28

Source : Elaboration personnelle

Annexe 3 : Paramétrage de la subvention pour l'adoption du système de conservation

Sub =20		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
X conv	ha	50	35,94	23,62	11,87	0	0	0	0	0	0
X cons	ha	60	74,06	86,38	98,13	110	110	110	110	110	110
Revenu	euro	43372	40736	40303	38648	35871	35774	36058	36803	37411	31822
Utilité	niveau	14999	13907	12903	11914	11049	10237	9383	8497	7584	6814
Erosion	tn	663,08	411,5	360,78	338,42	277,09	277,64	277,73	277,01	278,37	191,81
	tn/ha	6,03	3,74	3,28	3,08	2,52	2,52	2,52	2,52	2,53	1,74
Sub =40		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
X conv	ha	25	23,35	8,91	0	0	0	0	0	0	0
X cons	ha	85	86,65	101,09	110	110	110	110	110	110	110
Revenu	euro	45327	42589	41437	41098	40333	37863	37428	37235	37481	35814
Utilité	niveau	16280	15452	14691	13998	13275	12587	11881	11127	10331	9517
Erosion	tn	528,66	367,15	332,26	302,17	294,03	277,67	277,9	278,36	278,18	250,92
	tn/ha	4,81	3,34	3,02	2,75	2,67	2,52	2,53	2,53	2,53	2,28
Sub = 0		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
X conv	ha	104,5	104,5	92	63,04	32,01	23,1	13,72	11,64	7,51	3,57
X cons	ha	5,5	5,5	18	46,96	77,99	86,9	96,28	98,36	90,87	77,91
Revenu	euro	44753	40457	39630	38743	36649	35080	34219	34826	32838	29576
Utilité	niveau	14517	12971	11395	9895	8680	7635	6599	5581	4567	3853
Erosion	tn	966,58	529,21	483,63	388,06	338,57	305,93	275,52	276,97	238,83	182,61
	tn/ha	8,79	4,81	4,4	3,53	3,08	2,78	2,5	2,52	2,43	2,24

Source : Elaboration personnelle

Annexe 4 : Paramétrage de la taxe sur l'adoption du système conventionnel

Tax = 10		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
X conv	ha	91,42	61,71	23,99	24,63	16,64	7,15	5,35	3,32	1,56	1,02
X cons	ha	18,58	48,29	86,01	85,37	93,36	102,85	104,65	106,68	98,33	81,25
Revenu	euros	42063	39268	38695	38439	35011	35088	35682	36475	34879	31322
Utilité	niveau	13481	11933	10646	9466	8438	7482	6506	5513	4524	3822
Erosion	tn	824,42	477,28	359,88	356,32	300,27	275,88	277,32	278,96	245,97	186,81
	tn/ha	7,49	4,34	3,27	3,24	2,73	2,51	2,52	2,54	2,46	2,27
Tax = 20		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
X conv	ha	35,47	22,57	10,35	0	0	0	0	0	0	0
X cons	ha	74,53	87,43	99,65	110	110	110	110	110	100,82	82,26
Revenu	euros	39354	38226	36985	36985	34854	35571	36198	37046	35719	31856
Utilité	niveau	12752	11529	10366	9327,2	8384,8	7444,4	6480,3	5499,4	4519,3	3819,4
Erosion	tn	567,07	374,2	360,86	305,5	276,91	276,53	277,98	279,65	249,86	187,36
	tn/ha	5,16	3,4	3,28	2,78	2,52	2,51	2,53	2,54	2,48	2,28
Tax = 40		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10
X conv	ha	9,86	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X cons	ha	100,14	110	110	110	110	110	110	110	100,96	82,52
Revenu	euros	36796	36498	36249	36985	34854	35571	36198	37046	35719	31856
Utilité	niveau	12213	11283	10315	9327,2	8384,8	7444,4	6480,3	5499,4	4519,3	3819,4
Erosion	tn	485,79	603,21	1343,4	305,5	276,91	276,53	277,98	279,65	249,86	187,36
	tn/ha	4,42	5,48	12,21	2,78	2,52	2,51	2,53	2,54	2,47	2,27

Source : *Elaboration personnelle*