

Paris X – ENGREF – EHESS – INAPG – X - ENPC  
Ecole doctorale EMPO

**Diplôme d'études approfondies**

**Analyse des impacts économiques et  
environnementaux des évolutions des  
itinéraires techniques dans des  
exploitations de grandes cultures**

**Loïc GUINDE**

DEA Economie de l'environnement et des ressources naturelles  
2004 - 2005

Sous la direction de Jean-Claude SOURIE (INRA)  
Sous la supervision de Jean-Christophe BUREAU (INA-PG)

Octobre 2005

## Résumé

La prise de conscience par l'opinion publique et les décideurs de l'importance de la préservation de la qualité des eaux entraîne un besoin réel de disposer de mesures efficaces de lutte contre la pollution par les nitrates.

Le secteur agricole est le principal responsable de l'émission de nitrates, par l'utilisation massive d'engrais chimique et l'importante concentration des zones d'épandage des déjections des animaux d'élevage. Pour lutter contre la pollution par les nitrates, il est donc nécessaire de réduire les émissions polluantes du secteur agricole.

Cette étude rappelle d'abord les caractéristiques particulières de la pollution nitrique et les principaux instruments de politique environnemental dans la gestion de la pollution azotée. Un bilan des mesures mises en place jusqu'à aujourd'hui est ensuite réalisé afin de connaître les outils utilisés et les résultats obtenus.

La quantité d'engrais azotés est considérée comme le facteur principal responsable du niveau élevé des émissions de nitrates. L'objectif est donc de limiter leur consommation, et d'analyser les impacts d'une réduction des doses utilisées dans le cadre d'un modèle de simulation.

L'étude va donc consister à analyser la relation entre le niveau de fertilisation et le niveau de production agricole. L'établissement de cette relation permet d'identifier plusieurs itinéraires techniques par cultures et par exploitation différenciés par le niveau de la relation entre la dose d'azote et le rendement obtenu. Ces itinéraires techniques servent ensuite à la modélisation d'exploitations agricoles issues d'un échantillon d'exploitations réelles de grandes cultures. Ils permettent au modèle de s'adapter aux contraintes en modifiant les surfaces des cultures et les itinéraires techniques pratiqués.

Le modèle utilisé pour effectuer les simulations est fondé sur l'approche par la programmation mathématique. C'est un outil d'optimisation économique sous contrainte des systèmes de production. Il permet de simuler des changements de l'environnement agronomique, économique et réglementaire des exploitations.

Les scénarii de réductions de l'azote consommé sont basés sur des réductions par exploitation et par région (-10% et -30% de la quantité initiale). Ces réductions n'entraînent pas de modifications majeures des surfaces des cultures. Une réduction de 30% des consommations d'azote modifie cependant les choix des itinéraires techniques pratiqués, par une extensification totale du blé tendre et des orges, et une désintensification de toutes les cultures y compris celles à forte marge comme la betterave.

Une réduction de 30% de l'azote consommé par exploitation réduit le revenu de 19% (18€/ha). L'instauration d'un marché d'échange des quotas, réduit légèrement la perte à 16% (16€/ha). Ce marché est donc considéré comme peu efficace.

Une réduction de 30% au niveau régional peut être obtenue par taxation de l'azote à 175%. L'impact sur les revenus serait très important puisqu'il réduirait ceux-ci de 64% (64€/ha). Cette contrainte de réduction de 30% de l'azote régional induit une réduction des revenus de 16€/ha, avec un maximum de 22€/ha pour l'exploitation la plus touchée. Laisser le choix à l'agriculteur entre une réduction de 30% de sa consommation d'azote et un prélèvement sur ses aides d'une pénalité de 22€/ha permet d'atteindre la réduction régionale recherchée.

## Summary

Public opinion and politicians are now aware of the necessity to preserve the quality of our water, which means a need for real efficient measures to fight nitrogen pollution.

The agricultural sector is mainly responsible for the nitrogen emission, by using a huge quantity of fertilizer as well as an important concentration of animal dejections on the soil.

Therefore to fight nitrogen pollution, it's necessary to reduce polluting emissions in the agricultural sector.

This study explains the specific characteristics of nitrogen pollution and the main instruments in the environmental policy against the nitrogen pollution.

All the existing measures are studied in order to know which tools are used and what are the results.

The quantity of nitrogen fertilizer is considered as the main factor responsible of the high level of nitrogen emissions. The objective is to limit their consumption, and to analyse the impacts of a reduction through a simulation model.

The aim of the study is to analyse the relation between the level of fertilisation and the level of agricultural production. This relation allows the identification of different technical itineraries, by crops and by exploitation, with a difference in the relation between the quantity of nitrogen and the yield.

These technical itineraries are used for the modelisation of agricultural exploitation, from a sample of real exploitations on a large scale.

Therefore the model can be adapted to different constraints by modifying the size of the specific crop and the technical itineraries used.

The model is used to execute simulations and is based on a mathematical programming approach. It's an economic optimisation tool under the restraint of the different production systems. This model allows a simulation where different factors (environmental, economic, legal...) can be changed.

The reduction scenario of nitrogen consumption are based on reductions by exploitations and by regions (-10% to -30% of the initial quantity). These reductions don't involve major modifications for the repartition of the crops and its surface.

Nevertheless, a 30% drop of the nitrogen consumption modifies the choices of technical itineraries, with a total extensification of wheat and barley and a disintensification of all the others (even, the beet which has high profit margins).

A 30% reduction of nitrogen consumption by exploitations reduces the incomes of 19% (18€/ha). The setting of a market for exchanging quotas, reduces very slightly the loss to 16% (16€/ha). This market is not very efficient.

A 30% reduction at a regional level can be obtained by the nitrogen taxation at a rate of 175%. The impact on the incomes would be very important because it would reduce them by 64 % (64€/ha). This 30% reduction constraint of regional nitrogen implies incomes reduction from 16€/ha to a maximum of 22€/ha. The choice for the farmer between a 30 % reduction of the nitrogen consumption and a deduction of a 22€ / ha penalty on his subventions allows us to reach the regional reduction requested.

# Sommaire

RESUME .....	2
SUMMARY .....	3
SOMMAIRE.....	4
INTRODUCTION.....	6
<b>1. PROBLEMES ENVIRONNEMENTAUX ET POLITIQUES PUBLIQUES EN AGRICULTURE ...</b>	<b>7</b>
1.1 LES POLLUTIONS D'ORIGINE AGRICOLE : IMPORTANCE ET SPECIFICITES .....	7
1.1.1 <i>Prise en compte croissante des problèmes environnementaux et des pollutions d'origine agricole</i>	7
1.1.2 <i>Spécificité des pollutions d'origine agricole, et nécessité d'une politique publique (PAC)</i> .....	7
1.1.3 <i>Raisons de l'utilisations importante d'intrants et de l'intensification des pratiques agricoles</i> .....	9
1.2 LES PRINCIPAUX INSTRUMENTS DE POLITIQUE ENVIRONNEMENTALE.....	10
1.2.1 <i>Les instruments réglementaires</i> .....	10
1.2.2 <i>Les instruments économiques</i> .....	10
1.2.3 <i>Les autres instruments</i> .....	12
1.3 INVENTAIRE ET BILAN DES POLITIQUES DE LUTTE CONTRE LES POLLUTIONS AZOTEES .....	13
1.3.1 <i>Les politiques menées</i> .....	13
1.3.2 <i>Bilan des mesures mises en place</i> .....	17
1.3.3 <i>Pourquoi les quotas n'ont-ils pas été retenus</i> .....	18
<b>2 MODELISATION DE LA MESURE DE REDUCTION DES ENGRAIS AZOTES.....</b>	<b>19</b>
2.1 PROBLEMATIQUE : MISE EN PLACE D'UNE MESURE DE GESTION DE LA POLLUTION PAR LES NITRATES : QUOTAS AZOTES ET TAXE SUR L'AZOTE .....	19
2.1.1 <i>Les quotas azotés</i> .....	19
2.1.2 <i>La taxe sur l'azote</i> .....	21
2.1.3 <i>Modélisation d'une réduction des quantités d'intrants</i> .....	21
2.2 CARACTERISATION DE L'ECHANTILLON.....	27
2.2.1 <i>Caractéristiques physiques de l'échantillon</i> .....	27
2.2.2 <i>Résultats économiques</i> .....	28
2.3 ELABORATION DE NOUVEAUX ITINERAIRES TECHNIQUES : RELATION DOSE D'AZOTE/HA – RENDEMENT 30	
2.3.1 <i>Méthode des courbes de production</i> .....	30
2.3.2 <i>Discrétisation des valeurs de la courbe de production</i> .....	34
2.3.3 <i>Limite de la méthode des courbes de production</i> .....	35
2.4 LE MODELE UTILISE : MAORIE (MODELE AGRICOLE D'OFFRE REGIONAL DE L'INRA ECONOMIE).....	36
2.4.1 <i>Présentation du modèle</i> .....	36
2.4.2 <i>Discussion sur le modèle MAORIE</i> .....	44
2.4.3 <i>Modélisation des mesures de réduction des engrais azotés</i> .....	45
<b>3 SCENARIOS ENVISAGES ET RESULTATS .....</b>	<b>52</b>
3.1 CADRE GENERAL DES SIMULATIONS .....	52
3.2 LA SOLUTION DE REFERENCE .....	52
3.2.1 <i>Prix de vente des cultures</i> .....	52
3.2.2 <i>Les rendements</i> .....	53
3.2.3 <i>Les marges brutes</i> .....	54
3.2.4 <i>Les surfaces</i> .....	54
3.2.5 <i>Les revenus</i> .....	55
3.3 LES SCENARII ETUDIES .....	56
3.3.1 <i>Diminution du quota azoté par exploitation (-10%, -30%)</i> .....	56
3.3.2 <i>Simulation d'un marché des quotas, micromarché avec prix d'équilibre</i> .....	56
3.3.3 <i>Diminution d'un quota régional de -10% et -30%, et détermination du niveau de taxe nécessaire à la réduction des quantités d'azote</i> .....	57
3.4 RESULTATS OBTENUS .....	57
3.4.1 <i>Impacts sur les surfaces par cultures</i> .....	57
3.4.2 <i>Impacts sur les itinéraires techniques des cultures</i> .....	59
3.4.3 <i>Impact sur le revenu des exploitants</i> .....	60
3.4.4 <i>Bilan des mesures simulées</i> .....	65

<b>CONCLUSION</b> .....	<b>67</b>
<b>BIBLIOGRAPHIE</b> .....	<b>69</b>
<b>ANNEXES</b> .....	<b>72</b>
ANNEXE 1 : RECHERCHE D'UNE CORRELATION ENTRE LA DOSE D'AZOTE/HA ET LE RENDEMENT SUR L'ENSEMBLE DES EXPLOITATIONS DE L'ECHANTILLON.....	73
ANNEXE 2 : RECHERCHE DE L'INFLUENCE DE LA VARIABLE PEDOLOGIQUE SUR LA RELATION AZOTE – RENDEMENT. ....	74
ANNEXE 3 : LE MODELE « ESTIQUOTAS » D'ESTIMATION DES QUOTAS BETTERAVIERS DES EXPLOITATIONS AGRICOLES DU RICA. ....	75
ANNEXE 4 : GRAPHIQUE SERVANT AU CALAGE DU MODELE, EN COMPARANT LES SURFACES OBSERVEES AUX SURFACES OPTIMISEES POUR L'ANNEE 2000.....	76
ANNEXE 5 : COMPOSITION DE LA PART DU REVENU LIEE AUX PRODUITS DIVERS DANS LE REVENU AGRICOLE MOYEN DE L'ANNEE 2000 DES EXPLOITATIONS DES REGIONS BETTERAVIERES. ....	77

## Introduction

Dans un contexte où les problèmes environnementaux prennent une place de plus en plus importante dans l'esprit des décideurs et de l'opinion publique, la préservation de la qualité des eaux et des aliments revêt une importance toute particulière.

Dans le secteur agricole, l'utilisation massive de produits phytosanitaires et d'engrais chimiques, ainsi que la très forte concentration des zones d'épandage des déjections des animaux d'élevage participent fortement à la détérioration de la qualité des eaux. La majeure partie de la pollution par les nitrates est d'origine agricole. La lutte contre la pollution par les nitrates passe donc par une réduction des émissions polluantes du secteur agricole.

Dans le cadre de cette étude, un bref descriptif des caractéristiques particulières de la pollution nitrique sera effectué pour rappeler ses spécificités et l'intérêt des instruments de politique environnemental dans la gestion de ce problème. Après avoir passé en revue l'éventail de ces principaux outils, un bilan des mesures mises en place jusqu'à maintenant aura pour but de voir lesquels ont été utilisés, et quels ont été les résultats obtenus.

L'étude portera ensuite sur la recherche d'une mesure susceptible de participer à la résolution de la problématique de lutte contre la pollution par les nitrates. La quantité d'engrais azotés sera considérée comme un facteur majeur de pollution. C'est donc une analyse des impacts d'une réduction des doses utilisées qui sera testée. Cette réduction peut être obtenue par diverses mesures qui seront comparées lors de simulations.

Pour une représentation correcte des systèmes de production agricoles et de leurs réactions aux changements de leur environnement, il est nécessaire de pouvoir simuler les impacts d'une réduction des quantités d'engrais utilisées. Une partie de l'étude va donc consister à étudier la relation entre le niveau de fertilisation et le niveau de production, cette relation étant considérée comme la principale liaison entre ces deux variables. Grâce à l'établissement de cette relation, il sera ensuite possible d'avoir plusieurs itinéraires techniques par cultures et par exploitation différenciés par le niveau de leur relation entre la dose d'azote et le rendement obtenu. Ces itinéraires techniques seront ensuite utilisés lors de la phase de modélisation d'exploitations agricoles issues d'un échantillon d'exploitations réelles de grandes cultures.

Le modèle qui va être utilisé pour effectuer les simulations est fondé sur l'approche par la programmation mathématique. C'est un outil d'optimisation économique sous contrainte des systèmes de production. Une étape de modélisation des mesures à simuler ainsi que des particularités liées à l'échantillon utilisé devra être réalisée.

Une fois le modèle réalisé et susceptible de simuler des changements de l'environnement agronomique, économique et réglementaire des exploitations, différents scénarii de mesures de politique publique ayant pour but de réduire les quantités d'engrais azotés seront testées. Les impacts principaux de ces mesures seront ensuite analysés afin d'évaluer la pertinence de leur éventuelle mise en place.

L'objectif de cette étude sera donc d'explorer les effets de certaines mesures d'action publique sur les systèmes de production de grandes cultures, pour obtenir des éléments de réflexion sur la pertinence de leur éventuelle mise en place dans le cadre de la lutte contre la pollution par les nitrates d'origine agricole.

L'originalité de ce travail réside dans l'approche des problèmes environnementaux avec les outils de la programmation linéaire. C'est une approche micro-économique assez fine puisqu'elle s'appuie sur une modélisation au niveau des exploitations agricoles, qui permet de prendre en compte les facteurs agronomiques.

# **1. Problèmes environnementaux et politiques publiques en agriculture**

## ***1.1 Les pollutions d'origine agricole : importance et spécificités***

### **1.1.1 Prise en compte croissante des problèmes environnementaux et des pollutions d'origine agricole**

La prise de conscience de l'importance des problèmes environnementaux par l'opinion publique et les décideurs politiques est présente depuis la fin des années 80<sup>1</sup>.

Elle a été favorisée par une succession d'accidents techniques majeurs, d'une très grande ampleur : Bhopal (1984), Seveso (1986) ou Tchernobyl (1986). Les catastrophes écologiques planétaire tels que les marées noires (Amoco Cadiz en 1978), le trou de la couche d'ozone, les pluies acides, la destruction massive de la forêt amazonienne, ont aussi contribué fortement à l'émergence de la conscience environnementale<sup>2</sup>. Ces problèmes environnementaux ont été abordés et médiatisés au niveau international : Conférence de Stockholm en 1972, sommet de Rio en 1992, Kyoto en 1997, Johannesburg en 2002.

Parallèlement, une prise de conscience des impacts de plus grande proximité et plus liés à la vie quotidienne a commencé à germer. Les préoccupations environnementales concernant l'agriculture se sont accentuées à partir des années 1990 grâce à une forte contribution des médias<sup>3</sup>, et notamment des associations de consommateurs<sup>4</sup>. Les élevages intensifs de porcs en Bretagne responsables des marées vertes deviennent alors symboliques des pollutions d'origine agricole.

Les risques existants d'un impact non négligeable sur l'environnement de la consommation d'engrais et de produits phytosanitaires ont été signalés depuis longtemps<sup>5</sup>. La pollution considérée comme diffuse des eaux par les engrais est connue depuis plusieurs décennies<sup>6</sup> et est en constante augmentation<sup>7</sup>.

Les problèmes de potabilité des eaux de captage et de résidus de pesticides dans l'alimentation humaine sont aujourd'hui une préoccupation publique majeure. Les pratiques agricoles productivistes sont constamment considérées comme principales responsables de ces pollutions environnementales et alimentaires. Il existe donc une forte demande sociale de contrôle et de réduction de ces externalités agricoles négatives.

### **1.1.2 Spécificité des pollutions d'origine agricole, et nécessité d'une politique publique (PAC)**

On entend le plus souvent par pollution d'origine agricole, les pollutions par les éléments nutritifs (principalement par l'azote sous forme de nitrates), les pollutions par les produits

---

<sup>1</sup> Rapport Hénin, 1980 ; Directive Qualité des eaux destinées à la consommation humaine, 1980

<sup>2</sup> Bontems et Rotillon, 1998

<sup>3</sup> Bonny, 1994

<sup>4</sup> Magazine 50 millions de consommateurs, 1989 ; Que choisir, 1990

<sup>5</sup> Carson, 1962 ; Noïrfalise, 1974

<sup>6</sup> Catroux, et al., 1974 ; CTGREF, 1974

<sup>7</sup> European Environment Agency, 2002

phytosanitaires (insecticides, herbicides, fongicides...) et les émissions de gaz à effet de serre. On peut y ajouter les problèmes environnementaux liés à l'érosion des sols et à l'utilisation excessive des ressources en eau pour l'irrigation.

Le mémoire va traiter uniquement de la pollution par les nitrates, en écartant volontairement les autres problèmes, bien qu'ils soient souvent étroitement liés à cette pollution.

### **1.1.2.1 Pollution par les nitrates**

Les plantes assimilent l'azote sous forme de nitrates  $NO_3^-$ . Ces derniers sont très solubles dans l'eau, et ne sont pas stockés pas dans le sol. Un excédent par rapport aux besoins de la plante et une pluie suffisante entraînent une lixiviation de ces éléments nutritifs, et un drainage vers les nappes phréatiques.

Les nitrates sont considérés comme dangereux pour la santé au-delà d'une certaine concentration. La communauté européenne a fixé à 25mg de nitrates par litre d'eau potable le « niveau guide », et à 50mg le niveau admissible.

Une concentration excessive d'azote dans les eaux peut également engendrer un phénomène d'eutrophisation. Ce phénomène consiste en l'augmentation de la concentration en éléments fertilisants (azote et phosphore), qui provoque un développement excessif d'algues et de plantes aquatiques. La prolifération et la dégradation de ces algues et plantes entraînent une désoxygénation de l'eau, et provoquent une diminution de la biodiversité aquatique.

L'agriculture est considérée comme responsable des deux tiers de la pollution nitrique émise. Les deux sources principales de cette pollution sont les installations d'élevage et la surfertilisation des cultures.

Les élevages intensifs entraînent des contaminations élevées suite à l'épandage des effluents (fumiers, lisiers), mais qui sont plus localisées, plus ponctuelles, et donc plus faciles à traiter. Il faut donc principalement assurer les capacités de stockage nécessaires pour éviter les épandages en période sensible, c'est-à-dire en automne et en hiver à cause de la forte pluviométrie et de l'absence de cultures/couvert végétal pour absorber/retenir l'azote.

Pour les élevages on peut faire très facilement un ratio production effluent /surface, et évacuer en partie le problème d'identification du pollueur.

Les excédents azotés liés à la surfertilisation des cultures ou au manque de couverture des sols en hiver relèvent plus directement de la problématique de pollution diffuse et sont donc plus complexes à traiter. Ils concernent des surfaces très importantes<sup>1</sup>.

### **1.1.2.2 La pollution diffuse**

Une pollution est dite diffuse quand le règlementeur ne peut observer à un coût raisonnable les émissions individuelles des pollueurs.

Il est en effet extrêmement difficile de mesurer la contribution de chacun des agriculteurs à la pollution de la nappe phréatique. De plus, les quantités d'azote épandues ne reflètent pas directement le niveau de pollution émis.

Il existe de nombreux développements théoriques dans le domaine de la pollution diffuse<sup>2</sup>, mais il n'existe que de très rares validations par des applications à des cas concrets<sup>3</sup>. La pollution par les nitrates considérée comme une pollution diffuse est remise en cause par l'étude menée ici, puisque les pollueurs sont considérés comme identifiés. La quantification

---

<sup>1</sup> Armand-Madelin V., 1992

<sup>2</sup> Wu et Bablock, 1996

<sup>3</sup> Bontems, et al., 2003

des émissions polluantes par agriculteur n'est pas réalisée, mais ces données risquent de devenir accessibles assez rapidement.

### **1.1.2.3 Rôle des mesures de politique publique**

L'augmentation du rapport entre les quantités d'intrants (tels que les engrais) et le foncier permet d'augmenter la production à l'hectare, mais selon des rendements marginaux décroissants. La perte de valorisation marginale des intrants (c'est-à-dire par unité d'azote supplémentaire apportée) est en partie liée à l'augmentation des rejets dans l'environnement<sup>1</sup>. Un niveau d'intensification optimal serait une valeur où s'égaliseraient la productivité marginale avec le coût marginal collectif, nuisances comprises.

Le niveau optimal privé du producteur est supposé fixé au seuil d'égalisation entre la productivité marginale et le coût marginal du facteur. Il n'y a pas a priori de raison pour que ces deux optima soient les mêmes, et donc que la pollution soit automatiquement prise en compte par le pollueur comme une nuisance.

Le rôle des mesures de politique publique est donc de mettre en place des instruments visant à inciter les agriculteurs à modifier leur optimum économique, notamment par une internalisation dans les coûts de production des externalités négatives sur l'environnement.

### **1.1.3 Raisons de l'utilisations importante d'intrants et de l'intensification des pratiques agricoles**

Les systèmes de cultures des exploitations européennes ont été fortement influencés par la politique agricole commune (PAC).

Les objectifs d'autonomie alimentaire qui ont prévalu lors de l'instauration de la PAC et les incitations économiques correspondantes (prix élevés) ont conduit à une situation de surproduction et à une intensification croissante.

L'augmentation des rendements en agriculture n'a pu se faire sans un apport d'éléments fertilisants (N, P, K) nécessaires à la nutrition de la plante. La course aux rendements a donc amené les agriculteurs à utiliser de plus en plus d'engrais minéraux.

Le rapport de prix entre input et output est déterminant dans le choix du niveau optimal d'intrants utilisés lors du processus de production. La fixation des prix d'intervention des produits, des primes basées sur la quantité produite influent donc sur le choix des assolements et le niveau d'intensification des conduites culturales. Le prix de l'engrais azoté agit de même sur les quantités d'azote utilisées et par conséquent sur le niveau de production. Un fort soutien des prix des produits agricoles combiné à un prix de l'azote relativement faible entraîne donc une augmentation de la dose d'azote utilisée.

Le coût des intrants ne reflète pas leur coût social (qui correspond aux coûts des nuisances engendrées par la pollution). Les agriculteurs préfèrent donc consommer une quantité excessive d'intrants au regard de l'intérêt collectif. En plus des incitations économiques, on peut aussi expliquer leurs décisions de fertilisation par une aversion au risque climatique ; sachant que le risque de perte de rendement lié au manque d'engrais est largement supérieur au manque à gagner lié à un excès d'azote<sup>2</sup>. D'autre part, le prix de vente des produits agricoles peut dépendre de leur qualité. C'est le cas du blé à haute teneur en protéines, mieux valorisé qu'un blé classique. Le taux de protéine dépend directement de la disponibilité en azote pour la plante durant la phase de maturation. Il y a donc incitation à surfertiliser durant cette période pour assurer un taux de protéine rémunérateur.

---

<sup>1</sup> Mahé et Rainelli, 1987

<sup>2</sup> Rapport sur la pollution des eaux par les nitrates, Chambre d'agriculture, 1992

La dernière réforme de la PAC, par le compromis de Luxembourg en 2003, introduit la notion de découplage des primes. Le choix des productions ne se fait donc plus en fonction d'un niveau de prime associé à chacune des cultures, mais est plus directement dépendants des signaux prix des marchés.

Ce changement récent n'est pas aussi radical qu'il pourrait paraître. Depuis la réforme de l'Agenda 2000, les primes pour les oléagineux étaient déjà alignées sur les primes pour les céréales, et influaient donc peu sur les choix cultureux. De plus, le compromis de Luxembourg autorise un recouplage des aides de 25%, ce qui permet de conserver une certaine connexion entre primes et surface de production.

## **1.2 Les principaux instruments de politique environnementale**

Les instruments de politique environnementale sont des mesures institutionnelles qui ont pour but d'inciter les pollueurs à adopter un comportement moins polluant.

Deux catégories principales d'instruments peuvent se dégager : les instruments réglementaires et les instruments économiques. On trouve aussi quelques autres instruments moins facilement classables, tels que les outils informationnels ou les accords volontaires.

De nombreux travaux ont cherché à comparer l'efficacité de différents instruments économiques visant à corriger les effets des externalités négatives<sup>1</sup>. Notre but ici n'est pas de procéder à nouveau à cette comparaison, dont les résultats sont variables selon les externalités et le contexte socio-économique<sup>2</sup>, mais de voir l'éventail des instruments disponibles pour mettre en place des mesures de lutte contre la pollution par les nitrates, et ceux qui ont été utilisés jusqu'alors.

### **1.2.1 Les instruments réglementaires**

Ce groupe de mesures cherche à contraindre les pollueurs à réduire leurs émissions, sous peine de sanctions juridiques ou /et financières ou de conditionnalité d'aides. Le principe est la fixation de normes à respecter.

On peut appliquer ces normes à des quantités d'émissions de polluants. C'est le cas par exemple d'une concentration maximum de nitrates dans l'eau.

Les normes peuvent aussi être d'ordre technique, avec obligation d'utiliser des technologies particulières de limitation de la pollution, comme lors des étapes d'épuration des eaux.

Elles peuvent être fixées sur les produits eux-mêmes, en limitant les concentrations de certains polluants dans le procédé de fabrication.

Il peut s'agir de procédure d'autorisation administrative de mise sur le marché. Les produits phytosanitaires sont soumis à ce dispositif

### **1.2.2 Les instruments économiques**

Ces instruments s'intéressent à la modification de l'environnement économique du pollueur pour l'inciter à changer son comportement. Ils modifient le rapport coûts - bénéfices, via des signaux prix.

---

<sup>1</sup> Baumol et Oates, 1988 ; Kolstad, 2000

<sup>2</sup> Weitzman, 1974

### **1.2.2.1 L'écotaxe**

Par l'instauration d'une écotaxe, le régulateur cherche à augmenter les coûts des activités polluantes, le montant de cette taxe étant lié aux quantités de pollution émise.

Elle peut être basée sur les émissions elles-mêmes, si celles-ci sont relativement facilement mesurables. Elle peut aussi être calculée la consommation d'un intrant qui est responsable de la pollution, et considérée comme proportionnel à celle-ci. Ce serait le cas par exemple d'une taxe sur les engrais azotés, cherchant à influencer sur le niveau de pollution par les nitrates.

### **1.2.2.2 Les subventions**

Cet instrument est très proche du mécanisme de la taxe. Le principe est d'accorder une subvention au pollueur par unité de polluant non émis, en deçà d'un certain niveau de pollution de départ.

On voit bien que la subvention et la taxe ont la même logique d'incitation (en agissant sur les rapports de prix), mais que le payeur n'est pas le même. Dans le cas de la taxe, c'est le pollueur qui supporte le montant de la taxe, le principe pollueur – payeur est donc respecté. Dans le cas de la subvention, c'est généralement le contribuable qui paye. La taxe permet une modification de l'environnement économique du pollueur, et induit donc une diminution de la quantité de pollution émise. La recette de cette taxe est une source de revenu utilisable par le régulateur dans sa politique environnementale. Ces deux avantages liés à la taxe constituent un double dividende. La subvention ne permet pas l'obtention de ce double dividende.

Le système subventionné a donc une acceptabilité beaucoup plus forte que la taxe chez les pollueurs. Dans le contexte actuel où le lobby agricole est puissant, et où l'agriculture reste une image forte de l'identité commune, l'acceptabilité sociale des mesures est décisive lors des processus de mise en place de réformes de la politique agricole commune. De plus, le contrôle de l'application de nouvelles mesures est souvent délicat, et s'assurer de la coopération des pollueurs pour un certain autocontrôle est considéré comme nécessaire dans la réussite d'une réforme. En agriculture, la subvention reste donc davantage à l'honneur que la taxe.

### **1.2.2.3 Les permis négociables**

Cet instrument combine deux éléments distincts. Le premier consiste en la mise en place de restrictions physiques quantifiées sous formes de droits, permis ou engagements. Le second est une autorisation d'échange de ces droits entre agents, sous des conditions spécifiées par une autorité administrative. Certains agents peuvent donc choisir de réduire leurs émissions polluantes et de vendre les permis excédentaires, alors que d'autres ayant un coût d'abattement plus élevé décident d'acheter des permis supplémentaires pour maintenir voire augmenter leurs émissions.

C'est la possibilité d'échanger qui fait de cet outil un instrument économique et non un instrument réglementaire de type norme. L'interaction entre les agents vendeurs et acheteurs de permis détermine un prix d'équilibre, qui est le prix de marché de ces permis. Ce prix est indépendant de l'allocation initiale des permis<sup>1</sup>.

L'intérêt pour ces permis négociables (ou permis de pollution transférables) est croissant dans les pays de l'OCDE, bien que les problèmes de l'allocation initiale et de l'organisation du marché d'échange soient importants.

L'allocation initiale n'a pas d'effet sur le niveau du prix d'équilibre par contre son impact sur des critères d'équité et de redistribution est important. On peut répartir les permis

---

<sup>1</sup> OCDE, 2001

gratuitement, ou par vente aux enchères. Le système de vente aux enchères permet à l'autorité administrative responsable de se créer un revenu initial tout en influant sur la réduction de la source de pollution par limitation des quantités émises (hypothèse du double dividende). Mais les contraintes nouvelles imposées aux entreprises, ajoutées à l'effort financier initial d'achat de permis rendent cette alternative particulièrement impopulaire. Une allocation initiale gratuite est donc souvent la solution qui permet de mettre en place un marché de permis négociables.

Le « grand fathering » est la méthode d'allocation initiale qui tient compte du niveau des émissions polluantes des années passées, la référence historique, pour fixer le niveau initial. Elle est responsable d'effets distributifs importants<sup>1</sup>. Cette distribution semble cruciale dans l'acceptabilité d'une telle politique<sup>2</sup>. L'allocation initiale donne donc une rente aux entreprises bénéficiaires, et crée un transfert entre l'administration et les agents<sup>3</sup>, puisque ces droits sont susceptibles d'être cédés.

## **1.2.3 Les autres instruments**

### **1.2.3.1 Les instruments informationnels**

Ce n'est plus le signal prix qui est modifié par le régulateur, mais le signal informationnel. On cherche donc à inciter le pollueur à modifier son comportement polluant, via une modification de son environnement informationnel.

#### ***1.2.3.1.1 L'information sur les solutions de dépollution***

Il s'agit de créer et de diffuser de l'information sur des méthodes permettant de réduire la pollution, ou de subventionner cette diffusion. Le pollueur a donc accès à moindre coût (diminution des coûts de transaction) à une information lui permettant de réduire ses émissions polluantes.

#### ***1.2.3.1.2 L'information sur les dommages environnementaux***

C'est la mise en lumière des nuisances provoquées par le pollueur, et la diffusion de cette information auprès des consommateurs, qui provoquent un comportement de réduction des quantités polluantes émises.

### **1.2.3.2 Les accords volontaires ou négociés**

Une réduction de la pollution générée par un agent peut être issue d'une contractualisation entre le régulateur et le pollueur.

Ces accords sont généralement volontaires, car non obligatoire. En réalité, c'est souvent par pression de l'autorité publique sur les agents ou groupe d'agents que ces contrats sont passés s'ils sont réellement contraignants pour les pollueurs.

Le risque de ce genre d'instrument est lié à l'asymétrie qui peut exister entre les deux contractants. Ces instruments peuvent facilement consister à contractualiser des pratiques déjà existantes, sans les modifier.

---

<sup>1</sup> Stavins, 1997

<sup>2</sup> Kverndokk, 1995 ; Dinard et Howitt, 1997

<sup>3</sup> Kamps et White, 2003

## **1.3 Inventaire et bilan des politiques de lutte contre les pollutions azotées**

### **1.3.1 Les politiques menées**

Les préoccupations de la PAC d'avant 1992 étaient centrées sur les volumes de production et la constitution de revenus décents pour les agriculteurs.

Des prix élevés et une garantie de débouchés des productions ont provoqué l'intensification et la spécialisation de la production agricole. Ces modifications dans les systèmes agraires ont eu des effets négatifs sur l'environnement. La directive nitrates de 1991 témoigne de l'importance croissante des pollutions par les nitrates d'origine agricole.

A l'occasion de la réforme de la PAC de 1992, on remarque l'arrivée des premières préoccupations environnementales avec l'introduction de la jachère obligatoire, et l'apparition des premières mesures environnementales.

C'est en 1999, dans le cadre de la réforme de l'Agenda 2000 et avec l'introduction du deuxième pilier de la PAC, que les mesures environnementales prennent une dimension plus importante. Les agriculteurs sont tenus de respecter les normes environnementales minimales existantes (bonnes pratiques agricoles) mais il n'existe pas mise en place de mesures de contrôle. Ils ont de plus la possibilité de contractualiser de manière volontaire les mesures agri-environnementales dans le cadre des contrats territoriaux d'exploitation (CTE), puis des contrats d'agriculture durable (CAD).

En 2003, le compromis de Luxembourg conditionne les aides au respect des bonnes pratiques agricoles, et renforce les mesures agri-environnementales par un système de modulation des aides directes.

#### **1.3.1.1 La directive européenne nitrate<sup>1</sup>**

C'est une directive centrale dans la prise en compte par les pouvoirs publics de la pollution par les nitrates.

Cette directive doit être replacée dans un contexte législatif européen contenant trois autres directives phares:

- La directive 75/440/CEE qui fixe les normes de qualité pour les prélèvements d'eaux superficielles destinées à être rendu potables.
- La directive 80/778/CEE qui fixe les normes de qualité pour les eaux potables distribuées aux populations
- La directive 2000/60/CE qui établit un cadre pour une politique communautaire de l'eau

Constatant que la teneur en nitrates de l'eau ne cesse d'augmenter pour atteindre des niveaux élevés par rapport aux normes européennes (concentration maximale de nitrates autorisée de 50mg/l), et que les nitrates d'origine agricole sont la source principale de la pollution, la Commission Européenne décide en 1991 d'élaborer une directive visant à réduire cette pollution.

Les Etats membres doivent donc désigner les zones vulnérables sur leur territoire. La délimitation d'une zone vulnérable est basée sur une campagne de surveillance de la teneur en nitrates des eaux superficielles et souterraines. Les zones dépassant ou risquant de dépasser une teneur en nitrates de 50 mg/l sont déclarées vulnérables.

Les états doivent ensuite établir un ou des codes de bonnes pratiques agricoles, qui seront mis en œuvre volontairement par les agriculteurs. Pour cela, ils élaborent au besoin un programme de formation et d'information des agriculteurs afin de promouvoir ces pratiques.

---

<sup>1</sup> Directive Nitrates, 1991

Ces codes de bonnes pratiques agricoles doivent obligatoirement contenir les éléments suivants :

- Les périodes inappropriées d'épandage de fertilisants
- Les conditions d'épandage de fertilisants sur fortes pentes et sur sols détremés, inondés, gelés ou couverts de neige.
- La capacité et la construction de cuves destinées au stockage des effluents d'élevage
- Les modes d'épandage des engrais chimiques et des effluents d'élevage (niveau et uniformité).

D'autres éléments peuvent être inclus sans aucune obligation, comme l'utilisation d'un système de rotation cultures permanentes – cultures annuelles, le maintien d'une quantité minimale de couverture végétale durant les périodes pluvieuses, l'élaboration de plan de fertilisation, la prévention de la pollution des eaux d'irrigation.

Dans un délai de 2 ans, les états élaborent des programmes d'action sur les zones vulnérables à mettre en place dans les 4 ans suivants leur élaboration. Ces programmes comportent les règles concernant :

- Les périodes d'interdiction d'épandage de certains fertilisants
- La capacité des cuves destinées au stockage des effluents d'élevage, qui doit dépasser la capacité nécessaire au stockage durant la plus longue période la limitation de d'interdiction d'épandage.
- L'épandage des fertilisants en accord avec les conditions de bonnes pratiques agricoles de la région (prise en compte de l'état des sols, du climat, du système de rotation), fondé sur la méthode des bilans (équilibre entre besoins prévisibles en azote des cultures et apports par le sol et les fertilisants

Ces mesures visent à ce que pour chaque exploitation, les quantités d'effluents d'élevage ne dépassent pas 170 kg d'azote par hectare (210 kg / ha durant les 4 premières années), avec une possibilité de fixation de seuils plus élevés par les Etats s'il existe une justification (culture à forte absorption en azote, sols à forte capacité de dénitrification...).

Ce programme est élaboré par chacun des pays membre. En France, il prend la forme du Programme de Maîtrise des Pollutions d'Origine Agricole (PMPOA). La France ne cesse de se faire rappeler à l'ordre par la Commission Européenne pour non respect de cette directive. Elle a été condamnée le 27 juin 2002 pour une désignation insuffisante de zones vulnérables.

Dans ce texte, il n'existe pas dans ce texte de pénalités pour les pollueurs qui passent outre les recommandations de la Commission. Des sanctions seront mises en place avec la conditionnalité des aides.

### **1.3.1.2 Les PMPOA**

Le Programme de Maîtrise des Pollutions d'Origine Agricole (PMPOA) a été finalisé en octobre 1993. Il est directement lié à la directive nitrates, puisque c'est sous cette pression que l'accord entre les Organisations Agricoles et l'Etat a été conclu.

Le PMPOA repose sur une double démarche :

- L'Etat s'engage avec les Agences de l'eau et les Collectivités locales qui le souhaitent, à apporter un concours financier au programme de mise aux normes des bâtiments d'élevage.
- Prolongée par une amélioration des pratiques agricoles, la mise aux normes doit permettre de réduire les pollutions, et donc les redevances dues à ce titre par les éleveurs.

On obtient donc un dispositif paradoxal, où les pouvoirs publics paient pour que les normes (obligatoires par définition) soient appliquées.

Ce plan de lutte contre les pollutions agricoles ne tient compte que des sources azotées organiques, ne prend absolument pas en compte les fertilisants minéraux et ne s'applique donc pas aux zones de grandes cultures, malgré les fortes concentrations de nitrates dans les eaux dans ces zones.

### **1.3.1.3 Les mesures agri-environnementales<sup>1</sup>**

Les MAE ont été introduites pour accompagner la réforme de la PAC de mai 1992. Ces aides visent à encourager les pratiques de production respectueuses de l'environnement, et doivent compenser les manques à gagner ou les surcoûts de la mise en œuvre de nouvelles pratiques pour l'exploitant. Elles prévoient des engagements qui vont au delà des bonnes pratiques agricoles. Les MAE sont fondées sur l'engagement volontaire des agriculteurs. Elles sont souscrites pour 5 ans.

En France, la mise en place du programme agro-environnemental s'est traduite par l'instauration d'un dispositif à deux niveaux :

- La prime au maintien des systèmes d'élevage extensifs (PMSSE), qui est une mesure standard nationale. Cette mesure a été très fortement contractualisée, et concernait près de la moitié des prairies françaises en 1998.
- Les programmes régionaux, avec des cahiers des charges locaux. Ces programmes concernent notamment la protection des eaux (réduction d'intrants, reconversion des terres arables en herbages extensifs et retrait à long terme), la conversion en agriculture biologique, la diminution du chargement du cheptel et la protection des races menacées de disparition. La surface totale contractualisée sur ces mesures concernait en 1999 moins de 3% de la SAU nationale, et était localisée en quasi-totalité sur les espaces non bénéficiaires des aides de l'agriculture intensive.

Les évaluations des mesures agro-environnementales semblent montrer qu'elles sont relativement inefficaces en ce qui concerne les pollutions par les nitrates et les pesticides<sup>2</sup>.

Les contractualisations des MAE seraient principalement dues à un effet d'aubaine, de manière à se faire financer des pratiques déjà existantes. L'anticipation de nouvelles normes obligatoires plus strictes a pu pousser certains agriculteurs à s'engager sur des MAE.

### **1.3.1.4 Les CTE et CAD**

Le contrat territorial d'exploitation (CTE) est un outil créé par l'Etat français, le choix des outils à mettre en place étant laissé à la discrétion des Etats membres. Créé par la loi d'orientation agricole de 1999, son objectif est de rémunérer la multifonctionnalité des exploitations agricoles, c'est-à-dire l'ensemble des externalités positives.

C'est un contrat de 5 ans passé entre l'état et l'exploitant agricole. L'exploitant s'engage sur la réalisation d'un projet avec un volet économique et un volet environnemental. L'Etat, en retour, apporte une aide à certains investissements et certaines pratiques.

Ce contrat est basé sur un diagnostic d'exploitation, et un projet individuel est conçu à partir des mesures décrites dans les contrats types signés dans chaque département.

Le CTE est propre à la France, seul pays à avoir choisi d'inclure la contractualisation des MAE dans un projet d'exploitation. Dans les autres pays, les MAE peuvent être contractualisées indépendamment les unes des autres.

Le CTE est suspendu depuis août 2002 et remplacé par les contrats d'agriculture durable (CAD), qui sont des CTE aménagés et simplifiés, et qui autorisent les agriculteurs à souscrire indépendamment les différentes MAE.

---

<sup>1</sup> Règlement CEE 2078/92

<sup>2</sup> Notes et études économiques, L'évaluation de la politique de soutien à l'agroenvironnement, 2005

### 1.3.1.5 La conditionnalité des aides

Dans le cadre de la réforme de la PAC de 2003 (compromis de Luxembourg), le versement des aides PAC va être conditionné par des règles que chaque agriculteur devra respecter.

La conditionnalité consiste à établir un lien entre le versement intégral des aides directes, le respect de l'environnement, de la santé publique, des animaux et des végétaux, et du bien être animal<sup>1</sup>.

Concernant la lutte contre la pollution par les nitrates, il existe sept règles. Elles concernent les exploitations situées en zones vulnérables au sens de la directive nitrate de 1992 (zones caractérisées par la présence ou le risque d'apparition d'eaux polluées).

Ces sept règles sont les suivantes :

1. Existence d'un plan prévisionnel de fumure et d'un cahier d'enregistrement des pratiques d'épandage à jour.
2. Respect du plafond annuel de 170kg d'azote contenu dans les effluents d'élevage épandus par hectare de surface épandable (plafond défini par l'arrêté du 6 mars 2001).
3. Respect des périodes pendant lesquelles l'épandage est interdit
4. Epandage des effluents d'élevage dans le respect des distances par rapport aux points d'eau référencés au sein du plan d'épandage
5. Présence de capacités de stockage des effluents suffisantes et d'installations étanches
6. Implantation d'une couverture automnale et hivernale sur toutes les parcelles situées en zone d'action complémentaire (il s'agit de bassins versants situés en amont des prises d'eaux superficielles utilisée en approvisionnement en eau potable qui présentent des concentrations en nitrates supérieures à 50 mg/l).
7. Respect de l'équilibre de la fertilisation azotée (à partir de 2006)

L'agriculteur doit respecter ces règles sous peine de réduction du montant de ses aides directes. Cependant, quel que soit le cas envisagé, la réduction ne peut dépasser 5% du montant total des aides.

Les mesures 2, 4 et 5 concernent exclusivement ou quasi exclusivement les exploitations ayant des animaux d'élevage. Pour les exploitations de grandes cultures hors zone d'action complémentaire (zones d'alimentation en eau potable), respecter ces règles revient à établir un plan de fumure basé sur la méthode des bilans, et à tenir à jour un cahier d'enregistrement des pratiques.

Si les mesures de conditionnalité des aides permettent de transférer l'obligation du respect de la directive nitrates de l'Etat vers les agriculteurs, elles ne garantissent pas une diminution de la pollution nitrique. Une très grande majorité des agriculteurs raisonnent déjà leur fertilisation avec la méthode des bilans. Cette méthode consiste à ajuster les besoins en azote de la plante aux apports ajoutés au reliquat, pour un rendement objectif donné. Le respect de la mesure n'est donc pas une extensification des pratiques.

Une mesure de BCAE (Bonnes Conditions Agricoles et Environnementales) s'ajoute à ces règles. Elle concerne la totalité des exploitations bénéficiaires d'aides directes et consiste à mettre en place une surface minimale en couvert environnemental. L'agriculteur a donc l'obligation de consacrer 3% de sa surface en céréales, oléagineux et protéagineux, lin, chanvre et gel, à l'implantation de couverts environnementaux localisés, sous formes de

---

<sup>1</sup> Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales, Conditionnalité 2005 Livret I et II, décembre 2005

bandes d'une largeur de 5 à 10 mètres, de préférence le long des cours d'eau, ces surfaces pouvant être déclarées en gel.

L'objectif est principalement de limiter les risques de pollution dans les sols et les eaux. Cette mesure pourrait être efficace pour éviter de polluer directement les eaux de surface. Par contre, elle n'est pas une amélioration pour la pollution la plus importante, celle des nappes phréatiques, liée à une lixiviation verticale.

### 1.3.2 Bilan des mesures mises en place

L'évaluation des résultats des politiques de lutte contre la pollution par les nitrates n'est pas aisée, car la quantification de l'impact des mesures prises sur le niveau de pollution n'est pas directe.

Le passage d'une concentration de nitrates considérée comme trop élevée à une concentration moindre n'est pas toujours immédiatement observable, car il existe des délais de transferts. Ces délais sont extrêmement variables (selon la profondeur de la nappe, de son volume de recharge relatif au stock lui-même...)<sup>1</sup>, ce qui rend difficile l'attribution irréfutable des résultats mesurés à une politique.

Une grande partie des recommandations des agronomes concernant les solutions possibles de réduction des risques de pollution azotée touche directement à la gestion de l'azote et de l'interculture<sup>2</sup>. L'idée est donc d'ajuster au mieux la fertilisation au rendement objectif, en tenant compte de toutes les sources d'azote. Mais la difficulté de déterminer l'objectif de rendement possible, et surtout le reliquat réel d'azote dans le sol à la sortie de l'hiver, rend la méthode des bilans difficile à mettre en œuvre<sup>3</sup>. De plus, son efficacité pourrait être assez limitée du fait de l'accroissement cumulatif de la minéralisation des sols consécutif à l'intensification des agrosystèmes (c'est-à-dire de la diminution de la teneur en matière organique)<sup>4</sup>. Ce sont pourtant les mesures qui ont été le plus souvent choisies. Considérer l'ajustement de sa fertilisation par l'agriculteur comme l'outil central de réduction des pollutions azotées revient à considérer que le mauvais ajustement entre les besoins et les apports est responsable d'une grande partie de la pollution. Il n'y a pas de remise en cause du niveau du rendement visé par l'agriculteur, ni de sa couverture vis à vis de l'aléa climatique.

Toutes les mesures évoquées précédemment ont pour principe de soutenir les agriculteurs, par des systèmes d'aides ou subventions. Les mesures censées être les plus contraignantes sont le plus souvent des accords volontaires. Les mesures le plus souvent choisies ne respectent pas le principe pollueur payeur si souvent mis en avant comme principe directeur en droit de l'environnement.

Ce système de soutien des pollueurs ne semble pas permettre l'obtention de résultats environnementaux notables. De plus, il entraîne un déplacement des coûts de dépollution du pollueur vers le contribuable et le consommateur. Le mouvement des entrées-sorties des entreprises agricoles sur le marché s'en trouve fortement modifié, car soutenir une exploitation considérée comme polluante revient à maintenir son système de production, alors qu'il est nocif sous l'angle environnemental.

La reconnaissance des externalités positives de l'agriculture entretient certainement une certaine confusion. L'agriculture engendre des externalités positives dans toute la société profite, mais il n'y a pas de raison qu'il y ait compensation au sein d'une même exploitation entre les externalités positives et négatives sur l'environnement. Il est important de bien

---

<sup>1</sup> Mollard et al., 1998

<sup>2</sup> Lacroix, 1995

<sup>3</sup> Cerf et Meynard, 1989

<sup>4</sup> Bel et al., 1999

différencier la rémunération des externalités positives, les aides à la production et au soutien des revenus, des sanctions concernant les externalités négatives.

### 1.3.3 Pourquoi les quotas n'ont-ils pas été retenus

Lors du rapport d'évaluation sur la gestion et le bilan du PMPOA, en juillet 1999<sup>1</sup>, l'opportunité de créer un marché des droits à polluer a été soulevée, mais concernait uniquement des quotas d'épandage des effluents d'élevage. Le calcul du quota initial proposé se basait sur une conversion des effluents en équivalent azote, puis au produit d'une norme (autorisation d'épandage d'une certaine quantité d'azote par hectare), par une surface épandable détenue en propre par l'éleveur. Les exploitations excédentaires devaient payer des exploitations déficitaires pour se débarrasser du surplus non utilisable.

Les effets attendus étaient alors les suivants :

- Effet redistributif sur les revenus d'élevages extensifs.
- Développement moins rapide de la concentration géographique des élevages hors sol.
- Forte incitation à la comparaison des coûts des différentes options pour l'éleveur en cas d'excédent, et donc un développement des procédés de traitement.
- Une meilleure connaissance des pratiques réelles, les achats et les ventes étant déclarés.

L'expérience semblait paraître intéressante, mais certains points négatifs ont été soulignés :

- Besoin de prendre en compte les épandages d'azote minéral dans le calcul des droits.
- Besoin de prendre en compte les caractéristiques des sols concernés

C'est donc le calcul initial des droits qui semblait poser le plus de questions.

Le système de quotas échangeables n'est pas un instrument nouveau dans la boîte à outils des économistes puisqu'il a été théorisé en 1969<sup>2</sup>. Il est par contre relativement récent dans l'esprit des décideurs politiques et de l'opinion publique. Les permis négociables ont été mis en place pour la première fois aux Etats-Unis en 1990, afin de créer un marché national des permis d'émission de dioxyde de soufre (SO<sub>2</sub>) entre les centrales thermiques. Ils constituent l'un des instruments clé du protocole de Kyoto sur l'effet de serre.

Appelé aussi « droits à polluer », on leur reproche souvent la forme marchande qu'ils donnent aux émissions polluantes, ce qui participe à leur impopularité.

La régulation par un marché déplace le centre de pouvoir en matière de gestion de la pollution, vers le ou les lieux d'organisation de ce marché, et de transaction des ces permis. Cette modification des responsabilités peut être un frein à l'adoption des quotas.

---

<sup>1</sup> Rapport d'évaluation sur la gestion et le bilan du PMPOA

<sup>2</sup> Dales, 1968

## **2 Modélisation de la mesure de réduction des engrais azotés**

### ***2.1 Problématique : Mise en place d'une mesure de gestion de la pollution par les nitrates : Quotas azotés et taxe sur l'azote***

#### **2.1.1 Les quotas azotés**

##### **2.1.1.1 Limiter la pollution azotée par réduction des quantités d'azote chimique utilisées**

La pollution par les nitrates ne peut être considérée comme fonction des seules quantités d'engrais minéraux et organiques utilisés par les agriculteurs<sup>1</sup>. Il existe une multiplicité de facteurs agissant sur le niveau de pollution : les facteurs climatiques (importance et répartition temporelle des précipitations, températures, évapotranspiration...), agrologiques (propriétés physico-chimiques, hydrodynamiques et microbiologiques des sols), et agronomiques (type de culture, rotations culturales, travaux culturaux, pratiques de fertilisation, couverture des sols, profondeur d'enracinement...). Ces groupes de facteurs sont étroitement interdépendants et peuvent conduire à des situations plus ou moins favorables à la lixiviation des nitrates<sup>2</sup>. Les quantités d'azote apportées étant un des facteurs influant sur le niveau de la pollution azotée, on peut donc supposer donc qu'une diminution des quantités d'engrais utilisé a un effet positif sur la pollution par les nitrates.

Les effets d'un excès d'azote peuvent générer une pollution par les nitrates fortement différée dans le temps du fait de la complexité des phénomènes physico-chimiques en jeu. Les niveaux élevés de pollution nitrique observés aujourd'hui pourraient résulter d'un accroissement de la minéralisation des sols sous l'effet cumulatif de pratiques intensives<sup>3</sup>. Une mesure des concentrations en nitrates à un moment donné ne permet donc pas de faire directement a liaison avec les pratiques observées.

Le choix a été fait de poser l'hypothèse qu'une diminution des quantités d'azote épandues entraîne une diminution des dommages sur l'environnement. Des essais sur parcelles expérimentales confirment cette hypothèse. Une réduction de 38.5 à 46% du niveau de fertilisation a permis de diminuer de moitié les pertes en nitrates<sup>4</sup>.

L'azote apporté sur les exploitations de grandes cultures sont principalement d'origine chimique. Une limitation des approvisionnements par contrôle des factures à l'achat peut donc être envisagée, ceci est beaucoup plus facile qu'une mesure directe de la pollution nitrique émise. Un contrôle systématique d'une réelle diminution de la fertilisation via des mesures de reliquats azotés dans le sol après récolte serait non seulement peu satisfaisant pour quantifier la pollution émise, mais aussi très difficile à réaliser, sauf à des coûts très élevés.

---

<sup>1</sup> Mollard et al., 1998

<sup>2</sup> Bel et al., 1999

<sup>3</sup> Addiscott et al., 1991 ; Mary, 1992

<sup>4</sup> Essais réalisés sur le site de la plaine de Bièvre-Liers (région de La Côte-Saint-André, Isère) entre 1991 et 1993 ; Normand, 1996

### **2.1.1.2 Fixation des quotas par une approche d'optimum de second rang**

La norme différenciée comme la taxe pigouvienne permet l'égalisation des coûts marginaux de dépollutions de tous les pollueurs. Elle est optimale dans le sens où elle permet d'obtenir un niveau de pollution qui égalise les coûts marginaux de dépollution avec le dommage marginal, ce qui est socialement efficace. Mais cette optimalité n'est valide que dans le cas où le régulateur est parfaitement informé. Il doit donc connaître tous leurs coûts privés de dépollution, ainsi que la fonction de dommage<sup>1</sup>. Pour la norme différenciée, le régulateur doit de plus connaître tous les agents pollueurs.

Le cas de la pollution par les nitrates, ne remplit pas ces hypothèses. On est donc dans un cas où le régulateur connaît mal les coûts et les dommages. Les coûts marginaux de dépollution ne sont pas bien déterminés par les pollueurs eux-mêmes, et les dommages sont difficilement évaluables, et très atomisés chez les individus pollués.

Une solution possible est d'adopter une approche de second rang, en oubliant la recherche de l'optimalité<sup>2</sup>. La démarche consiste pour le règlementeur à fixer l'objectif à atteindre, et pour l'économiste à choisir les instruments pour l'atteindre, en minimisant le coût agrégé.

Dans le cas de notre étude, la relation entre engrais azotés et concentration en nitrates étant complexe, mais avérée, l'objectif à atteindre correspondra à une quantité maximale d'azote à épandre. Le but est donc d'obtenir cette réduction d'intrants au moindre coût. C'est donc sous ces contraintes que les agriculteurs vont modifier leurs pratiques pour diminuer leur impact environnemental négatif en matière de pollution par les nitrates.

### **2.1.1.3 Fixation des quotas par référence historique**

Le choix de l'allocation initiale des quotas renvoie à la problématique de l'équité de la mesure, ainsi qu'à son acceptabilité. L'allocation la plus courante est le « grand fathering », allocation sur la base d'une référence historique qui entérine une situation présente, et la fige pour l'avenir. Cette méthode d'attribution des quotas azotés permet aux plus grands consommateurs actuels de disposer d'une plus importante quantité d'engrais disponibles. Ce système n'est donc pas avantageux pour les exploitants ayant déjà cherché à réduire leur consommation, et pénalise les agriculteurs ayant les itinéraires techniques les moins intensifs.

La variabilité des quantités d'engrais azotés consommées par hectare est très importante. Il faut disposer d'un grand nombre de variables pour pouvoir déterminer les raisons de ces variations. Nous posons l'hypothèse forte que chacun des agriculteurs se trouve à l'optimum économique dans sa gestion des engrais azotés. Cette hypothèse exclut donc que la variabilité inter-exploitations soit liée à du gaspillage, ou à de mauvaises techniques. Depuis plusieurs années, une grande partie des gaspillages a déjà été résorbée grâce à l'évolution technique, et l'adaptation plus fine des apports d'intrants aux besoins des cultures<sup>3</sup>. La diversité des potentiels de sols, et des systèmes culturaux mis en place peut expliquer une grande partie de la variabilité. Donner à chacun le même quota par hectare ne semble donc pas plus équitable.

Décider d'un quota identique pour chacun des exploitants, sans tenir compte de ses besoins liés à la surface de son exploitation ne paraît pas non plus très adapté. Une hypothèse possible pourrait être la mise en place d'un seuil minimal d'unités azote autorisées, en dessous duquel la réduction d'intrants ne s'appliquerait pas.

Nous avons finalement choisi d'allouer les quotas d'azote selon une base historique par exploitation. Les achats étant vérifiables sur facture. La base historique permet de tenir compte des doses choisies par les agriculteurs pour assurer leur fertilisation. Ils ont une

---

<sup>1</sup> Kolstad, 2000

<sup>2</sup> Baumol, 1972

<sup>3</sup> Bonny, 1993

connaissance de la diversité des facteurs influents sur les techniques de fertilisation qui permet de penser que les doses d'engrais utilisées sont adaptées aux facteurs agronomiques et pédoclimatiques de leur exploitation. La référence historique choisie est la consommation de l'année 2000, année de base de notre échantillon. Ce quota est ensuite réduit proportionnellement à son montant initial. Lors de scénarii de diminution des quantités d'engrais azotés, la diminution en volume sera donc moindre pour une exploitation ayant un petit quota.

#### **2.1.1.4 Elaboration d'un système de marché des quotas**

Le système de permis azotés négociables est proposé par les économistes depuis plusieurs années comme un outil économique applicable à la problématique de la pollution par les nitrates. Les banques de lisiers sont considérées comme économiquement efficaces, dans le cas où il existe effectivement la possibilité de faire fonctionner un marché<sup>1</sup>. Les quotas d'azote doivent donc être échangeables, dans le cadre d'un système performant.

#### **2.1.2 La taxe sur l'azote**

La fixation d'une taxe sur l'azote vise à augmenter son prix pour diminuer la quantité utilisée. Une taxe sur les apports d'azote peut s'avérer efficace pour limiter une pollution si l'élasticité de la demande au prix est assez élevée. Cette question reste très controversée. Selon le modèle MAGALI, une taxe de 10% en valeur pourrait faire baisser la consommation d'engrais de 5%, compte tenu des substitutions entre culture. D'autres études ont montré qu'un doublement du prix de l'azote pourrait se traduire par une diminution de 20% des quantités consommées<sup>2</sup>. Mais certains travaux sont beaucoup plus pessimistes, du moins à court terme<sup>3</sup>. Avec une élasticité suffisamment forte, on peut cependant imaginer qu'une taxe assez élevée puisse entraîner une diminution des fuites d'azote. La taxe sur l'azote serait très facile à mettre en place, mais le niveau de taxe nécessaire au bénéfice environnemental recherché doit être compatible avec la diminution du revenu des agriculteurs concernés. Son niveau doit aussi correspondre au résultat environnemental souhaité.

#### **2.1.3 Modélisation d'une réduction des quantités d'intrants**

##### **2.1.3.1 Relation dose d'azote – rendement**

L'agriculture intensive se caractérise par une augmentation de la quantité d'input à l'unité de surface, dans le but d'augmenter les outputs. L'augmentation de la quantité d'intrants utilisés, et notamment d'engrais a des répercussions sur l'environnement.

Les fertilisants utilisés en agriculture regroupent trois éléments principaux : L'azote, le phosphore, et le potassium. L'azote est très soluble dans l'eau et est donc l'élément le plus susceptible de provoquer une pollution. C'est donc sur la réduction de l'azote que porte cette étude. Il ne semble pas y avoir de relation directe entre le niveau d'azote apporté et le niveau des autres éléments<sup>4</sup>. La réduction des doses d'azote peut donc être considérée comme

---

<sup>1</sup> Bureau D. et Bureau J.C., 1999

<sup>2</sup> Le Roch et al., 1996

<sup>3</sup> England, 1986 ; Rude et al., 1989

<sup>4</sup> Carles et Millet, 1995

indépendante des autres fertilisants. En ce qui concerne la relation entre les produits phytosanitaires et l'engrais azoté, l'indépendance est supposée. Il existe cependant certaines relations, notamment entre la dose d'azote apportée, le développement foliaire, et la probabilité d'attaques de ravageurs. Ces relations mériteraient d'être approfondies pour pouvoir corrélérer une baisse des doses d'azote à une diminution des charges en produits phytosanitaires.

La fertilisation azotée a pour but d'augmenter les apports en nutriments de la plante, pour accroître la production agricole. Une diminution de la quantité d'azote apportée entraîne donc une diminution du rendement. Une partie de l'azote est apportée sur le blé tendre en dernier apport, pour augmenter la teneur en protéine des grains, pour obtenir un blé de panification de meilleur qualité, et donc vendu plus cher. La distinction entre les différents blés n'étant pas réalisée dans la base de données RICA, cet effet recherché d'une fraction de la fertilisation ne sera pas pris en compte.

C'est la relation dose d'azote – rendement qui est donc au centre de l'étude. L'impact d'une diminution de la fertilisation va donc se traduire par une diminution des charges en engrais, ainsi que d'une diminution du rendement, et donc du produit brut des cultures.

### **2.1.3.2 Méthode de représentation de la relation entre dose d'azote et rendement**

Différentes méthodes peuvent être appliquées pour mettre en relation les doses d'azotes utilisées et le rendement obtenu. La méthode la plus adaptée dépend notamment des données utilisées. Dans le cadre de l'étude, les approches par l'économétrie de panel, la méthode DEA et la recherche de nouvelles variables discriminantes ont été écartées. La méthode des courbes de production a été retenue.

#### **2.1.3.2.1 La base de données retenue**

L'étude se base sur un échantillon d'exploitations céréalières issu des données des sondes technico-économiques, greffées sur le RICA (Réseau d'Information Comptable Agricole) depuis 1979. Le RICA permet par des typologies d'exploitations agricoles de connaître le revenu agricole, de suivre les capitaux engagés, l'investissement, l'endettement...

Les sondes technico-économiques fournissent des résultats analytiques par culture, et permettent une meilleure connaissance des fonctions de production, des choix d'activités, et des équilibres des appareils productifs. Le faible effectif des échantillons est en partie pallié par la finesse des résultats obtenus. Cette base de données « sondes grandes cultures » est réalisée en Ile de France et en Midi Pyrénées.

Pour chacune des exploitations enquêtées, on dispose de données concernant l'exploitation dans son ensemble (assolement, charges fixes, revenu, âge de l'exploitant...). On dispose aussi de tous les déterminants nécessaires au calcul de la marge brute de chacune des cultures. Les données concernant la fertilisation sont très précises. Pour chaque culture, la quantité d'azote, phosphore et potassium est exprimée.

Cette base de données est donc assez complète en ce qui concerne les données microéconomiques des exploitations. Elle permet de réaliser des simulations avec le modèle MAORIE. Ces données sont relativement fiables, et assez faciles d'accès, car l'UMR Economie publique est directement impliquée dans la collecte et le traitement de ces données. Après traitement de l'échantillon pour obtenir une bonne homogénéité du jeu de données, l'ensemble du groupe d'exploitations regroupe 46 exploitations de grandes cultures, localisées dans le département de Seine et Marne.

Différentes approches sont possible pour établir la relation azote rendement. Plusieurs ont été passées en revu, et testées, avant d'aboutir à la méthode des courbes de production retenue.

### **2.1.3.2 Données de panel non disponibles**

Pour obtenir une relation aussi proche que possible des caractéristiques de chacune des cultures de chacune des exploitations, l'économétrie de panel est bien adaptée. En disposant par exploitation d'une série de rendements pour chaque culture sur plusieurs années, il est possible d'analyser les variations de la quantité de fertilisant sur le rendement<sup>1</sup>.

L'échantillon utilisé regroupe les exploitation de la sonde grande culture d'île de France, soit un total de 46 exploitations pour l'année 2000.

Il est important de travailler sur des données relativement récentes, car le modèle de programmation linéaire utilisé permet de simuler les changement postérieures à la réforme de l'Agenda 2000. Les données des sondes 2002 et 2003 n'étant pas encore disponibles, le panel réalisable se limite donc aux années 2000 et 2001, sur un échantillon constant de 31 exploitations. Ces conditions ont donc été considérées comme non satisfaisante pour utiliser les méthodes économétriques.

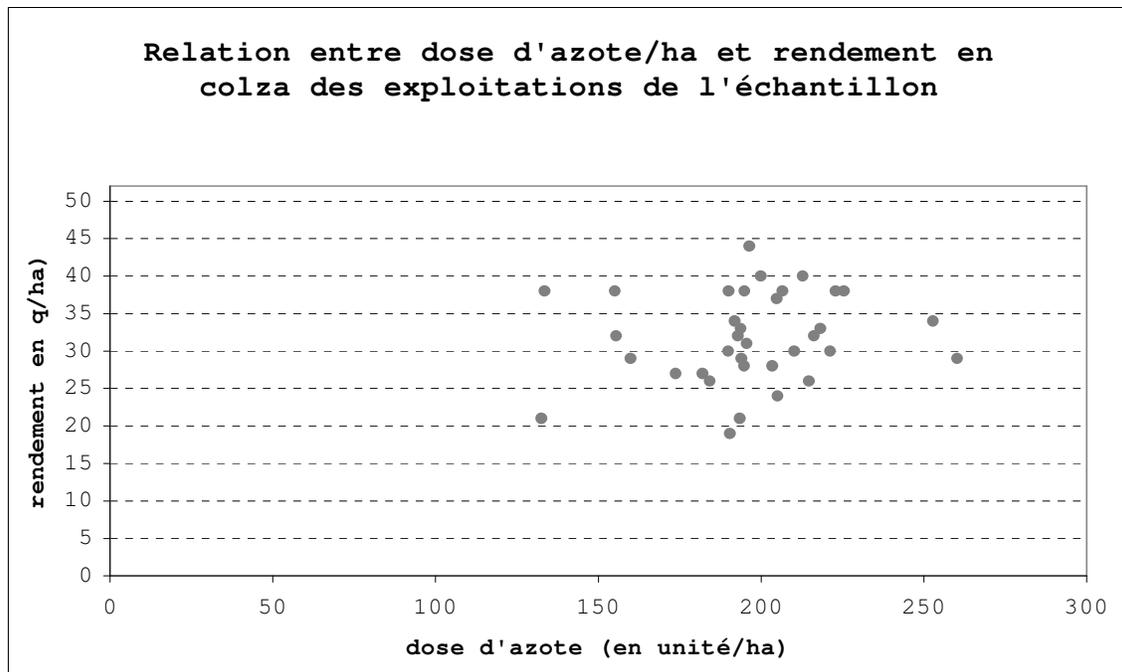
### **2.1.3.3 La méthode DEA**

La méthode DEA (Data Envelopment Analysis) a été développée par Charnes, Cooper et Rhodes en 1978. C'est une méthode non paramétrique d'estimation de frontières qui s'intéresse à des frontières plutôt qu'à des tendances centrales. Son but est de mesurer la performance d'une unité relativement à la performance d'unités semblables (même orientation technico-économique, même classe de taille...). Elle consiste à construire une frontière de production qui enveloppe toutes les observations de l'échantillon. Les exploitations les plus efficaces de l'échantillon déterminent cette frontière, et la distance des autres exploitations à cette frontière détermine leur degré d'inefficacité.

Cette méthode a l'avantage d'éviter les erreurs provenant d'une mauvaise spécification d'une fonction de production. Elle ne permet pas par contre de dissocier inefficacité et différences liées à d'autres facteurs. On dispose avec notre échantillon de la dose d'azote par hectare pour chacune des cultures et chacune des exploitations. Les doses par hectare pour une même culture sont très différentes d'une exploitation à l'autre.

---

<sup>1</sup> Thomas, 2000



Appliquer la méthode DEA à ce cas revient à postuler que la différence de rendement existant entre deux exploitations pour une même dose d'azote par hectare est due uniquement à l'inefficacité de l'agriculteur ayant le rendement le plus faible.

Cette hypothèse ne semble pas adaptée au cas traité. La diversité pédologique des exploitations permet à elle seule d'argumenter en faveur de l'existence d'un différentiel de potentiel de sol entre exploitations. Postuler que les agriculteurs qui ont les plus bas rendements sont les moins efficaces revient donc à avancer qu'ils gaspillent la quantité d'azote non valorisée.

Le choix fait pour ce travail a été de considérer que le positionnement des agriculteurs se trouve à l'optimum économique, et donc qu'il n'existe qu'une part négligeable de gaspillage. La méthode DEA a donc été écartée pour la réalisation de cette étude.

#### **2.1.3.2.4 Typologie par potentialité des sols**

La relation entre dose d'azote et rendement par culture ne peut être établie économétriquement pour chacune des exploitations, car nous ne disposons que d'une observation par exploitation comme nous l'avons vu précédemment. Pour adopter une approche économétrique, il faut disposer de plusieurs observations. L'idée est de considérer que chacune des exploitations est une observation d'un échantillon relativement homogène. La multiplication de ces observations doit permettre de trouver une forme fonctionnelle qui s'ajuste correctement à la série de données. Le choix des paramètres de cette fonction doit permettre de l'ajuster à chacune des exploitations présentes.

La grande diversité des données de l'échantillon ne permet pas de trouver une relation économétrique correcte<sup>1</sup>. La modification des paramètres nécessaires pour ajuster la relation à chaque exploitation ne permet pas d'extrapoler correctement le rendement propre à chacune des exploitations en fonction de la dose d'azote choisie.

Le problème est donc d'obtenir des groupes homogènes. On sait que le rendement obtenu est principalement fonction du climat de l'année, du type de sol, des précédents culturaux, et des

<sup>1</sup> cf. Annexe 1

techniques appliquées. La prise en compte de ces facteurs pourrait permettre de discriminer l'échantillon. Ces facteurs ne figurent malheureusement pas en tant que variables dans l'échantillon issu de la sonde RICA grandes cultures de Seine et Marne. L'approche économétrique voire la méthode DEA pourraient alors s'appliquer plus judicieusement à cet ensemble d'observations.

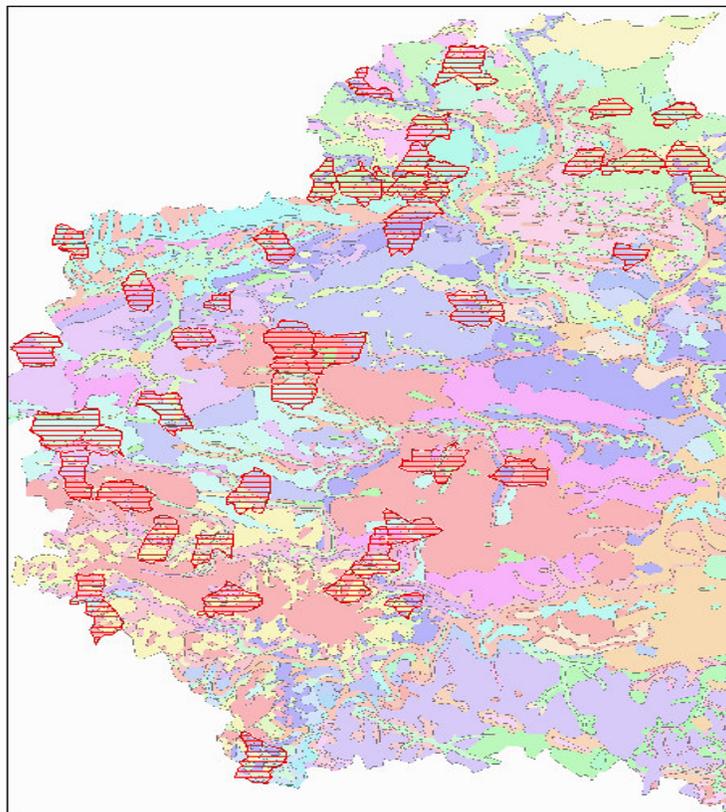
L'échelle départementale peut justifier l'élimination de l'effet climatique comme variable discriminante centrale entre exploitations. L'échantillon ne comprend que des exploitations professionnelles de grandes cultures. On peut supposer que la diversité des pratiques est relativement faible entre ces exploitations, et que les différences entre itinéraires techniques appliqués dans des conditions similaires sont assez faibles.

Ce raisonnement nous amène à considérer la variable pédologique comme le facteur déterminant de la variabilité de la valorisation des doses d'azote en rendement. En réintroduisant cette variable dans l'échantillon, on pense pouvoir créer des sous groupes ayant des caractéristiques pédologiques plus homogènes.

Dans la base de données utilisée figure le nom de la commune de résidence de l'exploitant. Il est donc possible de cibler la zone d'exploitation de manière plus précise qu'à l'échelle départementale. L'emplacement des parcelles reste inconnu. Dans le cas d'une répartition départementale assez tranchée des principaux types de sols, on peut espérer obtenir une dominante pédologique par exploitation.

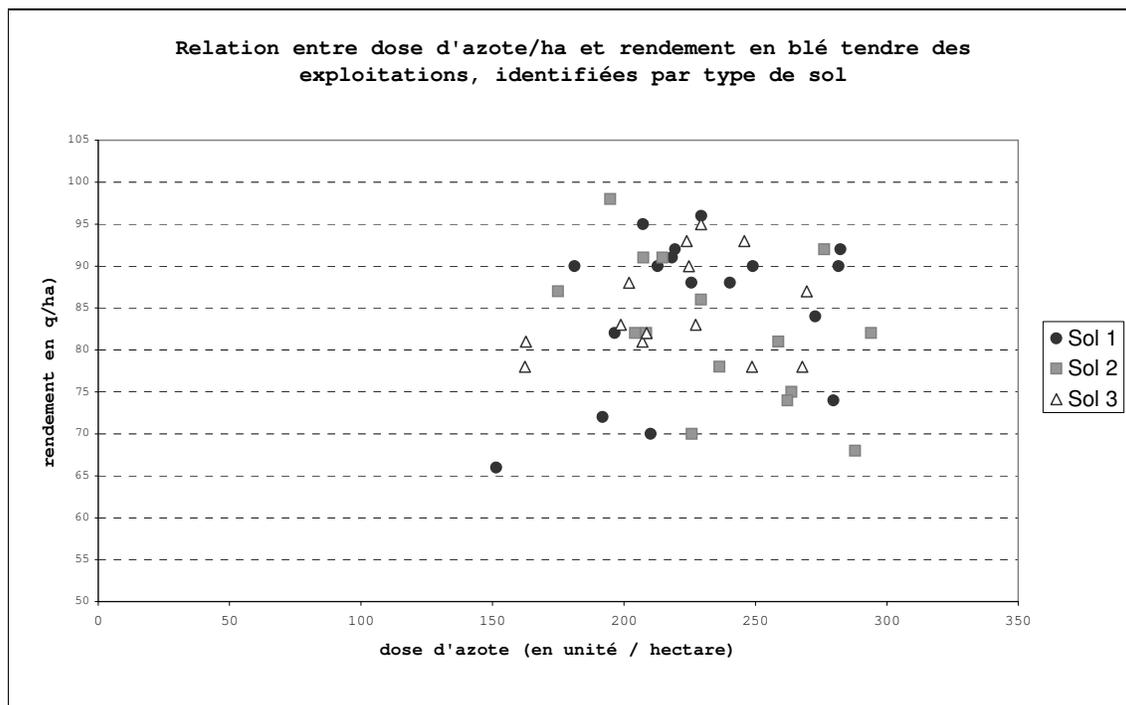
Une localisation géographique des communes ayant des exploitations sondées a été effectuée. Cette carte a été superposée à la carte des sols du département, qui se présente comme une mosaïque de sols.

### **Carte pédologique des sols de Seine et Marne, et localisation des territoires communaux des exploitations de l'échantillon**



Après un regroupement des sols les plus semblables en trois grands groupes de sols, une division de l'échantillon a été réalisée par les pédologues de l'INRA Orléans. Une nouvelle étude économétrique a été effectuée pour essayer d'observer une plus grande homogénéité des sous groupes obtenus.

La dispersion des relations azote - rendement par type de sol semble demeurer assez forte. On n'observe pas de données plus homogènes en ajoutant la variable pédologique.



L'établissement d'un modèle économétrique linéaire intégrant la variable sol n'améliore pas significativement la qualité des prévisions. La discrimination obtenue ne s'est pas avérée pertinente<sup>1</sup>.

Plusieurs raisons peuvent expliquer ce résultat. Premièrement, le regroupement de certains sols entre eux diminue la diversité des réponses à l'azote observées. Deuxièmement, attribuer un grand type de sol à une exploitation relève d'une forte approximation, une commune pouvant contenir plusieurs grands types de sols, et les parcelles de l'exploitations n'étant pas obligatoirement localisées sur la même commune que le lieu de résidence de l'exploitant. Troisièmement, le rendement disponible par exploitation dans la base de données est une moyenne des rendements de l'exploitation; Cette moyenne peut cacher une grande disparité des potentiels de sols inter parcellaire.

Cette approche nécessite donc une quantité de données très importante, non disponible dans la base de données des sondes grandes culture du RICA.

### 2.1.3.2.5 Les courbes de production

La méthode des courbes de production consiste à trouver une fonction paramétrique reliant la dose d'azote par hectare au rendement. La fonction est déterminée de manière à pouvoir représenter les phénomènes agronomiques concernés, et satisfaire la résolution du problème

<sup>1</sup> cf. Annexe 2

posé. Cette méthode a été utilisée dans le but d'obtenir les rendements correspondants à des niveaux de fertilisation différents. Le paramétrage de ces courbes n'est pas irréfutable, car il nécessite l'intervention d'hypothèses pour caler la relation. Cette méthode reste malgré tout très intéressante pour étudier l'impact de l'introduction de nouveaux itinéraires techniques sur la production agricole. En effet, les données expérimentales n'existent pas pour les exploitations de l'échantillon et doivent donc être simulées. C'est cette approche qui a été retenue pour obtenir les rendements correspondants aux niveaux de fertilisations déterminés.

## **2.2 Caractérisation de l'échantillon**

### **2.2.1 Caractéristiques physiques de l'échantillon**

Les caractéristiques suivantes sont issues des résultats observés en 2000 pour 46 exploitations.

#### **Caractéristiques moyennes de l'échantillon**

Nombre d'exploitations	46
SAU moyenne (en ha)	121
UTA totales	1.4
dont UTA salariés	0.2

La surface moyenne est de 121 hectares, avec 46% des exploitations entre 100 et 150 hectares, et 35% entre 50 et 100 hectares.

Le nombre moyen de travailleurs est de 1.4, ce qui semble un peu élevé pour des exploitations orientées vers la grande culture.

Pour situer le niveau de production moyen des exploitations de l'échantillon, il est intéressant d'avoir une idée des rendements moyens des principales cultures.

#### **Principaux rendements observés (en q/ha)**

	Rendement
Blé tendre	84
Pois protéagineux	47
Colza alimentaire & diester	31
Orge d'hiver	70
Orge de printemps	60
Betterave sucrière	790
Maïs grain	102
Tournesol	31

Les surfaces moyennes des cultures pour les exploitations de l'échantillon qui en ont sont les suivantes :

### Surfaces moyennes des cultures (en ha)

	Surface	Nbre d'exp.
Blé tendre	55	46
Pois protéagineux	13	34
Colza alimentaire	12	31
Colza diester	7	31
Orge d'hiver	13	30
Orge de printemps	19	26
Betterave sucrière	14	23
Maïs grain	19	14
Tournesol	9	14

Toutes les exploitations cultivent du blé tendre avec une sole moyenne de 55 hectares soit 45% de la SAU. Ce pourcentage en blé tendre évolue dans une fourchette de 30% à 60%. La deuxième culture la plus fréquente est le pois protéagineux avec une sole moyenne de 13 hectares pour 34 exploitations. Ensuite, une trentaine d'exploitations cultivent du colza et/ou des orges. Une exploitation sur deux bénéficie dans notre échantillon de quotas pour la culture de la betterave sucrière, et consacre ainsi en moyenne 14 hectares à cette production. Le montant de ces quotas n'est pas donné dans les relevés des sondes, et doit donc être recalculé à posteriori, grâce au modèle « Estiquotas »<sup>1</sup>.

### 2.2.2 Résultats économiques

Les résultats économiques peuvent être regardés au niveau de l'exploitation comme au niveau des cultures.

#### Résultats économiques moyens à l'exploitation (en €)

Revenu agricole moyen par exploitation	30738
Revenu agricole moyen par hectare	254
Charges fixes moyennes par ha	753

Le revenu agricole ou RCAI (Résultat Courant Avant Impôts) moyen est de 30738€ par exploitation, avec toutefois une forte dispersion puisque l'échelle va de 1 à 25. Dans une forte proportion, les revenus élevés (supérieurs à la moyenne) sont liés à la présence de la culture de la betterave sucrière. Ce constat n'est pas surprenant quand on examine les différentes marges brutes par culture.

---

<sup>1</sup> cf. Annexe 3

### Marges brutes des cultures (en €/ha)

	Marges brutes	dont aides
Blé tendre	903	380
Pois protéagineux	745	472
Colza alimentaire	692	492
Colza diester	625	380
Orge d'hiver	736	380
Orge de printemps	898	380
Betterave sucrière	2439	0
Maïs grain	910	380
Tournesol	775	492

La présence d'un quota betteravier sur une exploitation lui confère une véritable rente de situation puisque la marge moyenne par hectare de cette culture (2439€) est plus de deux fois supérieure à celle du blé tendre et plus de trois fois à celle du colza ou du pois. Concernant les aides compensatoires, il faut noter que l'année 2000 est la première année de la réforme sur trois ans de l'alignement des aides oléagineuses sur les aides céréales, ce qui constitue encore un réel avantage pour le colza et le tournesol.

L'observation des niveaux de charges variables par culture permet d'analyser plus précisément les différents déterminants de la marge brute.

### Charges variables moyennes et importance de la charge en engrais

	Charges variables totales (en €/ha)	Charges variables en engrais (en €/ha)	Part des charges variables / charges totales(en €/ha)	unités d'azote/ha
Blé tendre	358	121	34%	228
Pois protéagineux	295	68	23%	50
Colza alimentaire	345	149	43%	196
Orge d'hiver	361	121	34%	172
Orge de printemps	261	100	38%	125
Betterave sucrière	734	161	22%	146
Maïs grain	483	170	35%	172
Tournesol	349	100	29%	68

Le niveau de charges variables le plus élevé se rencontre pour la culture de la betterave. Il intègre pour cette culture une charge en semence élevée (200€/ha en moyenne), un coût de recours à l'entreprise relativement important et fréquent (18 exploitations sur 24 avec un coût moyen de 156€/ha et un maximum de 300€/ha, ce qui correspond à l'ensemble des travaux de récolte).

Dans le cadre de cette étude, il semble important de relever la part importante que représente l'engrais tant en valeur totale à l'hectare qu'en unité d'azote épanchée à l'hectare pour la culture la plus importante qu'est le blé tendre. Dans cet échantillon, le blé tendre et le colza sont très fortement consommateurs d'azote.

## **2.3 Elaboration de nouveaux itinéraires techniques : Relation dose d'azote/ha – rendement**

### **2.3.1 Méthode des courbes de production**

La modélisation microéconomique réalisée avec le modèle MAORIE utilise les déterminants des cultures présentes sur une exploitation pour simuler des changements possibles liés à une modification de l'environnement économique ou réglementaire de l'agriculteur. Pour permettre une plus grande flexibilité des systèmes de cultures aux changements, il semble important de permettre l'introduction de nouveaux itinéraires techniques. Partant de données d'exploitations réelles, dans le but de conserver la diversité régionale des exploitations, il est indispensable d'adapter les nouveaux itinéraires techniques introduits aux conditions initiales des exploitations pour simuler les adaptations personnalisées des agriculteurs.

Il n'y a donc pas d'introduction de nouvelles cultures, qui ne sont pas déjà présentes dans l'assolement de l'année de référence de l'exploitation. L'introduction de nouveaux itinéraires techniques est donc réalisée par une modification des itinéraires techniques initiaux, sur les cultures initialement présentes.

L'effet étudié est celui d'une modification de quantités d'azote apportées sur les cultures. Dans le cadre de la modélisation, un nouvel itinéraire technique est donc réalisé par l'introduction d'un nouveau rapport entre la dose d'azote/ha et le rendement.

Pour simuler la relation entre ces deux variables, la méthode retenue a été l'élaboration des courbes de production. Il faut donc choisir la forme fonctionnelle adaptée, puis effectuer un paramétrage de cette courbe de production. La discrétisation de ces courbes est ensuite réalisée pour déterminer les niveaux de rendements correspondant à des taux de réduction des doses de fertilisant azoté.

#### **2.3.1.1 Choix de la forme fonctionnelle**

De nombreuses formes fonctionnelles peuvent être utilisées pour représenter une relation entre un niveau d'intrant et un niveau de production. Le choix dépend en grande partie du problème à traiter. Généralement, on cherche à déterminer la fonction s'ajustant au mieux à une série de points disponibles, afin de pouvoir extrapoler la relation pour les valeurs non observées. Selon les considérations théoriques retenues ou la qualité de la représentation de la réalité recherchée, on choisira un modèle différent.

La fonction de réponse la plus utilisée en l'absence de modèle théorique bien défini est l'équation polynomiale, et plus particulièrement le modèle quadratique. A côté de cette forme représentative, on retrouve très souvent le modèle de Mitscherlich, basé sur l'hypothèse des rendements moins que proportionnels pour représenter les réactions aux variations de fumure des plantes de grande culture<sup>1</sup>. Ce modèle fait partie de la famille des fonctions exponentielles. La comparaison de deux des principales formes fonctionnelles a abouti au choix de la forme quadratique comme fonction la plus adaptée à la réalisation de l'étude.

---

<sup>1</sup> Oger, 1994

### 2.3.1.1.1 Les fonctions exponentielles

La courbe de rendement qui sera retenue devra être spécifique à chaque culture et chaque exploitation. Elle doit être croissante et concave. Cette courbe passe par le couple donné pour l'année initiale dose d'azote/ha – rendement. Ce point sera considéré comme l'optimum économique pour l'année de référence (car on a supposé les agriculteurs économiquement rationnels). Les scénarii envisagés par la suite ne traiteront pas d'une augmentation de la dose d'azote/ha. La limite finie de la fonction quand la quantité d'azote tend vers l'infini est donc une condition superflue car ne faisant pas partie de notre domaine d'étude.

La forme fonctionnelle choisie est :

$$R = R_{\max} - (R_{\max} - R_{\min}) \cdot e^{-\theta \cdot N}$$

Avec :

- $R$  le rendement de la culture
- $R_{\max}$  le rendement maximum de la culture
- $R_{\min}$  le rendement minimum de la culture
- $N$  le niveau d'azote par hectare appliqué à la culture
- $\theta$  le paramètre d'ajustement de la fonction de production

$R$  et  $N$  sont connus par exploitation et par culture. Il s'agit des données de l'échantillon disponibles pour l'année de référence. Le  $R_{\min}$  ne peut pas être connu par observation, sauf expérimentation très poussée dans chacune des exploitations et sur chacune des cultures ( $R_{\max}$  est connu par dires d'experts).

On impose que les conditions suivantes :

- la courbe doit passer par le point ( $N_{\text{observé}}, R_{\text{observé}}$ )
- la courbe est asymptote à la droite d'équation  $R = R_{\max}$
- les agriculteurs sont à l'optimum économique pour le point observé, d'où le programme suivant :

$Max\Pi = p \cdot R(N) - w \cdot N$  avec  $p$  le prix du produit et  $w$  le prix le l'unité d'azote

$$\frac{\partial \Pi}{\partial N} = 0 \text{ d'où } \frac{\partial R}{\partial N} = \frac{w}{p} \text{ pour le point de référence}$$

On obtient donc la relation

$$\theta = \frac{w}{p} \times \frac{1}{(R_{\max} - R)}$$

L'équation étant surdéterminée, il est possible de déduire  $R_{\min}$  et de déterminer  $\theta$  en connaissant  $R_{\max}$  ;  $p$  et  $w$  sont également connus. Une extraction de la série de rendement sur les 15 dernières années de chacune des cultures issues des données de la sonde grande culture de Seine et Marne a été relevée. Cette série permet de connaître  $R_{\max}$  de l'exploitation ayant les niveaux de production les plus élevés. Le rendement maximum possible sur le département est supérieur au plus élevé de la série. Il est proche de celui-ci. On ne dispose pas de données de panel pour les exploitations de l'échantillon, mais uniquement de données

issues du même dispositif d'enquête sur la même zone géographique. Le  $R_{max}$  ne peut donc être déterminé différemment par exploitation. Il est donc fixé au niveau départemental.

Après détermination de  $\theta$  et de  $R_{min}$ , une vérification des valeurs de  $R_{min}$  a été réalisée pour vérifier la cohérence de l'ordonnée à l'origine calculée. Il s'est avéré que cette valeur ne correspondait pas aux valeurs réellement possibles. La valeur de  $R_{min}$  dépend de la distance entre  $R_{max}$  et  $R$ .  $R_{max}$  n'étant pas directement lié au rendement de la culture par exploitation, il est nécessaire d'encadrer la valeur de  $R_{min}$  pour rester dans un intervalle réaliste.

Un intérêt fort de l'approche par la fonction exponentielle est de déterminer les paramètres sans avoir à estimer le rendement obtenu par une fertilisation azotée nulle. L'approximation du  $R_{max}$  rend difficile l'obtention d'une courbe suffisamment représentative de la réalité du phénomène à représenter sans passer par une estimation du  $R_{min}$ .

Pour choisir cette forme fonctionnelle, il faudrait pouvoir délimiter clairement son domaine de validité, et restreindre les simulations à cette zone. Une délimitation objective est difficile à mettre en place et une restriction forte des scénarii envisagés par la suite ne semble pas judicieuse pour explorer les effets de fortes diminutions d'intrants sur les rendements. La fonction exponentielle n'a donc pas été retenue comme forme fonctionnelle de la courbe de production.

### 2.3.1.1.2 Les fonctions polynomiales

L'autre forme fonctionnelle très courante est la fonction polynomiale. C'est cette forme qui sera finalement retenue. Elle est de la forme suivante :

$$R = a \cdot N^2 + b \cdot N + R_{min}$$

Avec :

- $R$  le rendement de la culture
- $N$  le niveau d'azote par hectare appliqué à la culture
- $R_{min}$  le rendement minimum de la culture
- $a$  et  $b$  les paramètres d'ajustement de la fonction de production

$R$  et  $N$  sont connus pour l'année observée.

Le  $R_{min}$  ne peut pas être connu par observation, il doit donc être estimé au mieux. Il n'est pas possible de connaître pour chaque exploitation de chaque culture le rendement qui pourrait être obtenu sans apport d'azote. Cependant, à dire d'expert, il est possible d'estimer un rendement minimum par culture sur le département. Avec la fonction exponentielle, l'estimation porte sur le rendement maximum et le rendement minimum. La fonction polynomiale limite l'estimation au rendement minimum.

On impose les conditions suivantes :

- la courbe doit passer par le point  $(N_{observé}, R_{observé})$
- l'ordonnée à l'origine est  $R_{min}$
- les agriculteurs sont à l'optimum économique pour le point observé, d'où :

$$Max\Pi = p \cdot R(N) - w \cdot N$$

avec :

$p$  prix de vente du produit

$w$  prix le l'unité d'azote

$$\frac{\partial \Pi}{\partial N} = 0 \text{ d'où } \frac{\partial R}{\partial N} = \frac{w}{p}$$

On obtient donc les relations suivantes :

$$a = \frac{w \cdot N + p \cdot (R_{\min} - R)}{p \cdot N^2}$$

et

$$b = \frac{2p \cdot (R - R_{\min}) - w \cdot p}{p \cdot N}$$

### 2.3.1.2 Paramétrage de la forme fonctionnelle de la courbe de production choisie

L'estimation des courbes de production n'est pas réalisée pour chaque culture. Seules les cultures les plus présentes dans les exploitations sont traitées. La multiplication des itinéraires techniques des cultures marginales ne semble pas nécessaire pour analyser les processus de modification de fertilisation au sein des exploitations.

#### Classement des cultures par surface totale et effectif de présence dans les exploitations de l'échantillon

culture	surface totale	effectif total	Classement par surface totale	Classement par effectif total
Blé tendre	2536	46	1	1
Colza	588	35	2	2
Orge de printemps	498	26	3	5
pois	429	34	4	3
Orge d'hiver	396	30	5	4
Betterave	320	23	6	6
Maïs	261	19	7	7
tournesol	125	14	8	8
féverole	58	5	9	9

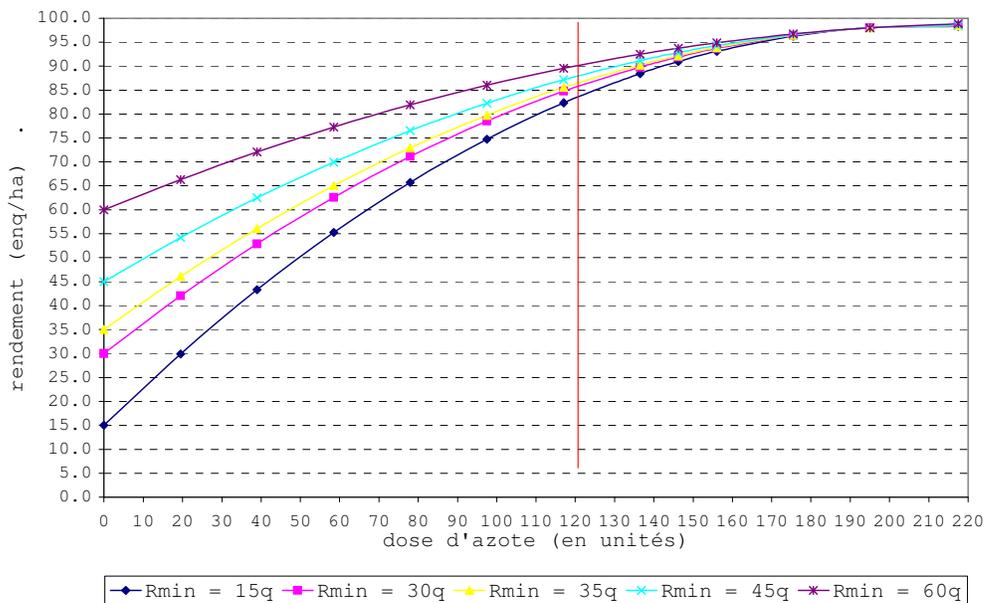
Le tournesol et la féverole ne sont donc pas étudiés comme cultures extensifiables. Le pois n'est pas retenu non plus, car c'est un protéagineux. Il n'a donc pas besoin d'apport d'azote durant son cycle cultural.

Pour paramétrer les courbes des cultures les plus importantes, il faut évaluer l'ordonnée à l'origine. Selon l'expertise de l'unité d'économie publique de l'INRA de Grignon, les rendements retenus pour des itinéraires techniques sans apports azotés sont les suivants :

culture	rendement estimé sans fertilisation azotée
Blé tendre	35 q
Colza	10 q
Orge d'hiver	35 q
Orge de printemps	30 q
Betterave	30 t
Maïs	35 q

Une analyse de sensibilité a été réalisée pour essayer d'évaluer l'impact d'une modification du choix du rendement minimum sur les valeurs de rendement qui seront utilisées par la suite lors de la modélisation. Les simulations de diminution du niveau d'azote seront réalisées entre la dose actuelle et -50% de la dose actuelle. La sensibilité est donc observée là où la différence de rendement de la partie utilisée sera la plus importante.

**Courbe de production du blé tendre d'une exploitation de Seine et Marne. Relation entre dose d'azote et rendement, en fonction de l'hypothèse de rendement minimum**



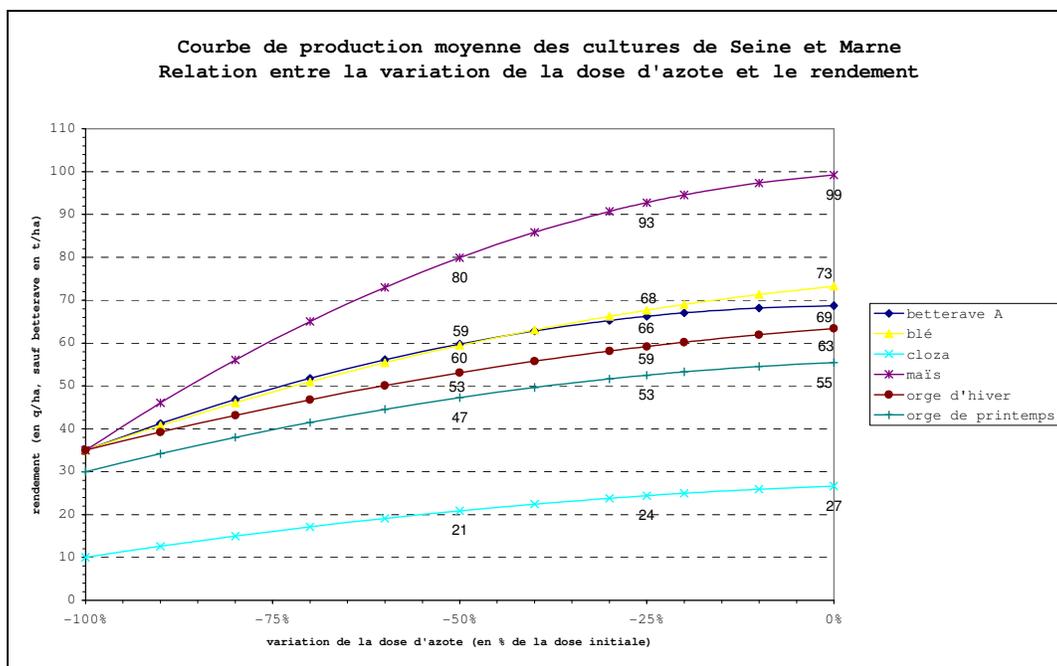
Sur cet exemple d'exploitation, une dose de 50% de la quantité initiale d'apport d'azote représente 120 unités. L'étude de sensibilité a été réalisée sur un intervalle très important (de 15 à 60 quintaux). En réalité, l'incertitude est beaucoup moins grande, car on estime que le rendement minimum en blé en Seine et Marne se situerait à 35 quintaux plus ou moins 5 quintaux. Une erreur d'évaluation du rendement minimum en blé de 5 quintaux se traduit par une variation de 1 quintal pour un niveau de fertilisation de 50% de la dose d'azote actuelle. L'erreur commise est donc considérée comme acceptable.

### 2.3.2 Discrétisation des valeurs de la courbe de production

Des courbes de productions obtenues, seules quelques valeurs vont être utilisées lors des simulations. L'introduction de la fonction de production directement dans le modèle crée une

non linéarité, ce qui augmente considérablement le temps de résolution, et diminue par conséquent la souplesse d'utilisation du modèle<sup>1</sup>.

Les trois niveaux de charges distincts (initiale, 25%, 50%) associés à leur rendement sont considérés comme trois itinéraires techniques différents, et introduits comme des activités de manière exogène dans le modèle MAORIE.



Cette démarche permet aussi d'avoir une lecture plus claire des résultats du modèle. Un agriculteur qui désintensifie une culture peu choisir de réduire sa fertilisation de 25% (semi extensification) ou de 50% (extensification).

### 2.3.3 Limite de la méthode des courbes de production

L'approche paramétrique a été choisie. Elle implique qu'on choisisse correctement la forme fonctionnelle, et qu'on puisse estimer correctement les paramètres de la courbe de production. La forme quadratique a été choisie pour toutes les cultures de toutes les exploitations. On peut penser qu'une étude plus fine des variations de rendement liées à une modification de la fertilisation azotée pourrait permettre de différencier la forme fonctionnelle par culture. Mais une multiplication des essais sur le terrain serait nécessaire pour disposer de ces informations qui resteraient incomplètes et imparfaites.

La valorisation de l'azote est liée aux conditions pédoclimatiques. Le problème a été soulevé quant à la robustesse du choix du rendement minimum. L'utilisation des modèles de simulation agronomiques comme STICS ou CERES peut être intéressante pour essayer de caler de manière plus satisfaisante les courbes de production. Ce « couplage » nécessite cependant une quantité d'informations assez importante.

<sup>1</sup> Préault, 2004

## **2.4 Le modèle utilisé : MAORIE (Modèle Agricole d'Offre Régional de l'INRA Economie)**

### **2.4.1 Présentation du modèle**

#### **2.4.1.1 Introduction**

Le modèle MAORIE est un modèle de programmation mathématique (modèle de programmation linéaire) qui cherche à représenter le fonctionnement technico-économique des exploitations de grandes cultures.

Il optimise les assolements, en maximisant le revenu agricole des exploitations tout en respectant un ensemble de contraintes techniques, économiques et réglementaires.

Il prend en compte la diversité des systèmes de production grâce à l'utilisation d'un échantillon d'exploitations réelles, issues du RICA, qui sont considérées comme représentatives des systèmes étudiés.

Les résultats individuels sont ensuite agrégés au niveau régional. Le modèle final est donc un assemblage convenablement pondéré de modèles élémentaires d'exploitations, auxquels sont ajoutées éventuellement des contraintes communes à l'ensemble.

La modélisation mathématique est un outil intéressant car elle donne en même temps que la solution optimale des valeurs duales très pertinentes pour l'analyse. Pour chaque contrainte imposée au système qui limite les facteurs de production disponibles, on obtient une valeur duale, nulle si la contrainte n'est pas saturée, positive dans le cas contraire. Elle indique la variation de la fonction objectif induite par une variation marginale de la quantité de facteur. Cela permet par exemple d'obtenir des niveaux maximums de prix pour l'achat des facteurs. Pour une contrainte azotée exprimée en unité d'azote, la valeur duale donnera l'accroissement de la fonction objectif (le revenu agricole généralement) découlant de la mise à disposition d'une unité d'azote supplémentaire.

Le modèle est séquentiel. Après chaque optimisation, des règles de décisions concernant l'évolution des structures sont appliquées, pour obtenir le nouveau contingent d'exploitations agricoles soumis à l'optimisation suivante. Cette succession d'optimisations suivie de règles de décision se déroule sur une séquence temporelle allant de 2002 à 2012.

Ce modèle a été créé dans un but d'aide à la décision publique, dans un contexte de modifications de politique agricole. Il permet de prendre en compte les impacts des évolutions de politique agricole sur les structures de production agricole au niveau régional.

La programmation de ce modèle est réalisée sous le logiciel GAMS.

Dans un premier temps, nous allons présenter le modèle MAORIE dans sa conception et son fonctionnement de base. Nous présenterons ensuite les modifications réalisées afin de pouvoir modéliser les mesures étudiées concernant les réductions de fertilisation azotée.

#### **2.4.1.2 Description du modèle**

##### **2.4.1.2.1 Le modèle unitaire d'exploitation :**

L'objectif du modèle est de maximiser chaque année le revenu agricole de chaque exploitation. La maximisation est réalisée sur le critère de la marge brute par hectare de culture. Une formalisation simple de la modélisation en programmation linéaire d'une exploitation peut se présenter sous la forme suivante :

La fonction objectif de chacune des exploitations:

$$Max \Pi = \sum_{c \in C} x_c \cdot \mu_c - \lambda$$

Où :

- $x_c$  variable hectare de culture c
- $\mu_c$  marge brute par culture et par hectare
- $\lambda$  charges fixes globales
- $c$  indice des activités cultures

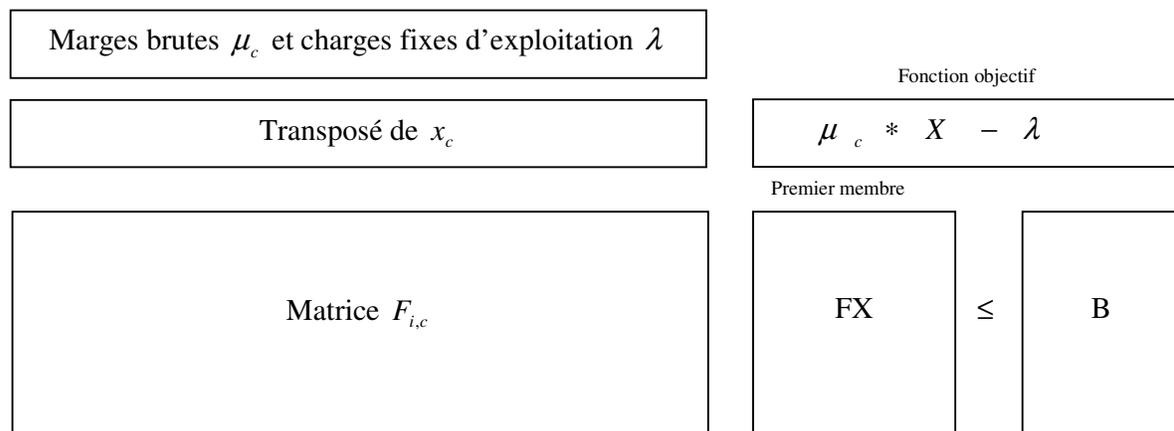
Et le système de contraintes:

$$F_{c,i} \cdot x_{c,i} \leq b_{c,i}$$

Où :

- $F$  matrice des coefficients techniques
- $B$  ressources en facteurs de production
- $i$  indice des contraintes

Le programme linéaire peut être représentée comme suit :



La surface par culture est la variable d'ajustement de la fonction objectif.  
 Les marges brutes sont données par culture et par exploitation.

#### 2.4.1.2.2 Matrice et contraintes :

L'assolement optimal obtenu en maximisant le revenu agricole doit respecter un système de contraintes. Ces contraintes sont d'ordre technique, agronomique, réglementaire.

Une représentation matricielle du système de contraintes avec  $F_{i,c}$  la matrice des coefficients techniques est de la forme suivante :

Cultures alimentaires													cult jach	ener	hors	cult jach	ener	sur	Jach nue
ble	ble_prec	bledeble	orgehiv	orgeprintps	transf1	transf2	bett_a	bett_b	bett_c	luzerne	colza	pois	colza_est	bett_eth	ble_eth	colza_est	bett_eth	ble_eth	jach

Marge/ha (€)	435	485	376	338	490	0	0	2520	1523	55	357	440	438	459	566	437	234	485	211	-24
--------------	-----	-----	-----	-----	-----	---	---	------	------	----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

variables ha	29.3	15.0	0.0	0.0	10.0	0.0	0.0	8.0	2.4	2.1	0.0	8.2	15.0	0.0	0.0	0.0	3.3	0.8	1.4	4.4
--------------	------	------	-----	-----	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----	------	-----	-----	-----	-----	-----	-----	-----

Fonction Objectif	59747.06
-------------------	----------

1	terre	1	1	1	1	1			1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
2	teteassolement								1	1	1	1	1	1	1		1	1			1
3	cerealesmax	1	1	1	1	1										1				1	
4	colzamax											1		1			1				
5	protmax											1									
6	bettmax							1	1	1					1				1		
7	bleprec	1					1	-1	-1	-1		-1		-1	-1		-1	-1			-1
8	blebonprec		1								-0.5		-1								
9	blenonassole	-0.3	-0.3	1																	
10	precorgehiv	-1	-1	-1	1	1	-1	-1								-1				-1	
11	precluz				-1						0.5										
13	gestb							0.3	-1												
12	gestc							0.17	0.17	-1											
14	minjach																1	1	1	1	
15	maxjach																1	1	1	1	
16	deborgeprint					1															
17	maxquota							77	77												
18	contratcolz													30			30				
19	contratbett														77			77			
20	contratble															80				80	

Pmembre		Smembre
100.00	<=	100
44.31	<=	50
55.69	<=	100
11.55	<=	25
15.00	<=	15
13.31	<=	30
0.00	<=	0
0.00	<=	0
-13.29	<=	0
-35.69	<=	0
0.00	<=	0
0.00	<=	0
10.00	>=	10
4.45	<=	30
10.00	<=	10
800.00	<=	800
100.00	<=	100
65.00	<=	65
110.00	<=	110

Nous retrouvons dans cette représentation les différents éléments intervenant dans la constitution d'un modèle unitaire d'exploitation.

Les colonnes de la matrice des coefficients techniques contiennent les différentes activités de l'exploitation, c'est-à-dire les différentes cultures présentes.

Une même spéculation peut se décliner en plusieurs activités, s'il existe des différences dans ses caractéristiques. Par exemple, le blé est une spéculation subdivisée en 5 activités. On distingue 3 blés alimentaires. Leur niveau de charges variables et de rendement diffère selon la nature de leur précédent agronomique. Le blé est considéré comme un blé à précédent « classique ». Le blé de précédent vient après une tête d'assolement favorable, comme une légumineuse, et a donc un meilleur rendement (+3q/ha) et une charge en engrais moins importante (-10€/ha). Le blé de blé, lui, a un rendement moins élevé (-5q/ha), ainsi qu'une légère hausse de charges variables, due à l'augmentation des traitements phytosanitaires (+5€/ha pour un traitement contre le piétin) et à l'augmentation de la fertilisation azotée (+10€/ha). Cette variation des charges en engrais de +/- 10€/ha en engrais correspond à environ 20 unités d'azote. Cette différence entre les blés est la même quelque soit le niveau de fertilisation de l'exploitation, et pourrait être modulé en fonction des doses d'azote apportées l'année de référence. On distingue également 2 blés énergétiques, l'un exclusivement sur jachère, l'autre hors jachère.

On retrouve sur les lignes de la matrice des coefficients techniques les contraintes du modèle. Elles sont ici numérotées de 1 à 20.

Le premier nombre est le produit de la variable exprimée en hectare par le coefficient technique. Il doit satisfaire une condition d'inégalité vis-à-vis d'un second membre que l'on fixe. Dans l'exemple traité ici, la surface de l'exploitation est fixée à 100 ha.

On peut distinguer plusieurs grands groupes de contraintes qui se ressemblent de par leur nature ou leur structure.

- La contrainte 1 est une contrainte de structure. Elle limite la somme des surfaces de l'ensemble des cultures à la surface totale de l'exploitation, ici 100 ha.
- Les contraintes 2 à 6 sont des contraintes agronomiques. On impose ici un pourcentage de surface maximum possible pour une culture ou un groupe de culture. Par exemple, les têtes d'assolement sont autorisées sur 50% de la surface totale au maximum.

De même, la surface occupée par l'ensemble des betteraves ne peut dépasser 30% de la surface de l'exploitation.

Ces limites sont liées à des obligations agronomiques, et établies par observation des surfaces maximums dans les exploitations.

Pour le colza, la limite maximum est fixée à 25% de la surface totale, pour les protéagineux à 15%, et pour les céréales à 100%.

- Les contraintes 7 à 11 sont des contraintes de bilan. Leur but est de gérer les successions de cultures.

La contrainte « Bleprec » détermine les cultures qui fournissent de la surface à la culture du blé (en l'occurrence, ce sont les têtes d'assolement « classiques »).

La contrainte « Blebonprec » détermine les cultures fournissant de la surface à la culture du blé de bon précédent. Il s'agit des bonnes têtes d'assolements pour le blé (luzerne, pois).

La contrainte « blenonassole » gère la surface autorisée dans le modèle pour faire du blé sur blé. Dans ce cas, on autorise 30% de blé sur les surfaces en blé.

La contrainte « precorgehiver » n'autorise la culture de l'orge qu'après un blé.

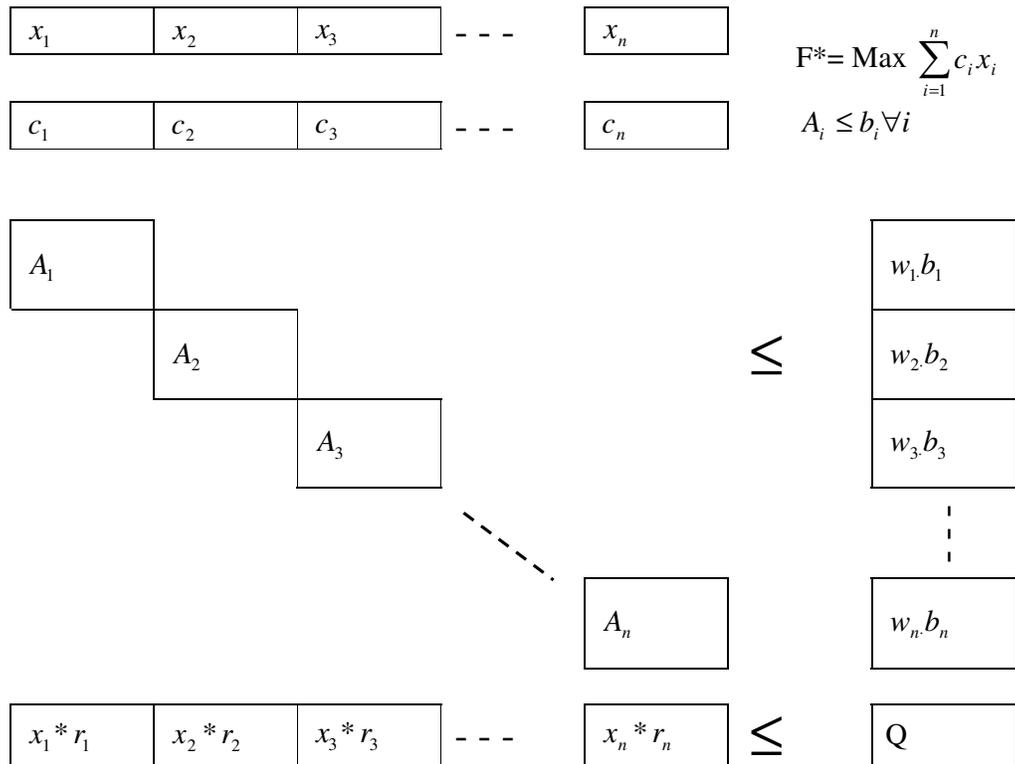
Cette dernière contrainte semble trop rigide, puisque dans la réalité, il est possible de faire de l'orge après une tête d'assolement. Les deux activités de transfert (transf1 et

- transf2) ont été ajoutées dans le but de recréer de la souplesse à ce niveau et permettent de faire de l'orge d'hiver après une tête d'assolement.
- La contrainte « precluz » autorise la luzerne à succéder à l'orge d'hiver. Le coefficient 0.5 s'explique par le fait que la luzerne reste en place 2 ans sur le parcelle, il faut donc mobiliser 1 ha d'orge pour avoir 0.5 ha de luzerne.
- Les contraintes 12 et 13 concernent la répartition de la betterave en plusieurs activités. La contrainte « gestb » contrôle la répartition des surfaces entre les quotas de production A et B. La surface en Betterave B doit être supérieure ou égale à 30% de la surface en betterave A. Cette contrainte est réglementaire. La contrainte « gest c » oblige une production de betterave C à 17% minimum des surfaces en betterave A et B. Cette proportion correspond à la production nécessaire pour assurer le quota. Elle a été calculée en considérant les variations de rendement sur les dix dernières années, afin d'assurer chaque année au minimum la production du volume du quota.
  - Les contraintes 14 et 15 concernent la réglementation sur la jachère PAC. La contrainte « minjach » oblige la somme des surfaces en jachère nue et en cultures énergétiques sur jachère à être supérieure ou égale à 10% de la surface de l'exploitation. On peut remarquer que c'est la seule contrainte en supérieur du modèle. La contrainte « jachmax » autorise à avoir une surface en jachère inférieure ou égale à 30% maximum de la surface. Cette surface comprend la jachère PAC ainsi que les cultures énergétiques.
  - La contrainte 16 « deborgeprint », est une contrainte qui limite la surface en orge de printemps à la surface initiale observée sur l'exploitation. Cette culture est sous contrat. Elle ne peut donc pas être augmentée à souhait, malgré une marge brute intéressante. Cette contrainte à débouché limité concerne aussi d'autres cultures non traitées dans l'exemple ci-dessus (l'avoine, le blé dur, le lin fibre, la luzerne, le maïs, l'orge d'hiver et la pomme de terre). Le modèle peut apporter de la souplesse à ces contraintes.
  - Les contraintes 17 à 20 fonctionnent sur le même principe que la contrainte 14, mais elles limitent la quantité produite. Les cultures concernées par ces contraintes sont des cultures dites « à contrat », pour lesquelles l'exploitant doit contractualiser une certaine quantité à livrer avec un industriel. C'est le cas des cultures énergétiques, mais aussi de la betterave, régie par le système des quotas. Dans ce type de contrainte, c'est le rendement de l'exploitation dans la culture considérée qui apparaît dans la matrice. Si la quantité maximum autorisée reste fixe, une augmentation des rendements entraîne donc une diminution des surfaces autorisées.

#### **2.4.1.2.3 Le modèle régional**

Le modèle régional est un assemblage des modèles unitaires d'exploitations. Ceux-ci peuvent être pondérés afin de permettre une bonne représentativité du modèle. De nouvelles contraintes sont introduites au niveau régional. Elles s'appliquent par exemple à l'ensemble de l'offre régionale, somme des offres unitaires des exploitations.

Le modèle régional peut être représenté de la manière suivante :



avec :

- $x$  le vecteur des surfaces
- $c$  le vecteur des marges des cultures
- $A$  la matrice des coefficients techniques
- $r$  le rendement des cultures offertes par exploitation
- $b$  la ressource en facteurs de chaque exploitation
- $w$  la pondération des exploitations
- $Q$  la demande régionale de culture

La contrainte  $\sum_{i=1}^n x_i r_i \leq Q$  limite l'offre régionale à la quantité  $Q$ . Elle peut être écrite en supérieure si la quantité doit être obligatoirement produite.

Un certain nombre de contraintes sont appliquées au niveau régional.

On pose deux grands types de contraintes régionales :

- La contrainte « terretotale » assure que la somme des surfaces totales des exploitations de l'échantillon est égale à la surface totale de l'échantillon.
- Les contraintes de quantités régionales fonctionnent sur le même principe, mais s'adressent à des quantités produites.

Elles sont mises en œuvre pour la modélisation des cultures industrielles, généralement contingentées au niveau régional, sous forme de contrats par exploitations. C'est le cas de la betterave. Une réforme du système des quotas betteraviers au niveau européen peut se traduire par une modification du volume des

quotas alloués au niveau régional, ce qui permet de desserrer la contrainte d'offre régionale. Le modèle effectue alors une allocation optimale de ce volume de quota additionnel entre exploitations.

### 2.4.1.3 Ecriture formelle du modèle MAORIE complet

- **Indices**

$r \in R$	indice des régions
$e \in E$	indice des exploitations agricoles
$c \in C$	indice des cultures
$c_1$	ensemble des cultures céréalières
$c_2$	ensemble des cultures colza
$c_3$	ensemble des cultures tournesol
$c_4$	ensemble des cultures protéagineuses
$c_5$	ensemble des cultures betteravières
$c_6$	ensemble des cultures têtes d'assolement
$c_7$	ensemble des cultures soumises à des contraintes de débouchés en surfaces
$c_8$	ensemble des cultures soumises à des contraintes de débouchés en quantités
$c_9$	ensemble des cultures énergétiques
$k \in K$	indice des contraintes rotationnelles et de bilan
$k_1$	contrainte de gestion des précédents à blé de qualité classique
$k_2$	contrainte de gestion des bons précédents à blé
$k_3$	contrainte de gestion du blé précédent à blé
$k_4$	contrainte de gestion des précédents à l'orge d'hiver
$k_5$	contrainte de gestion des surfaces en betterave de quota B
$k_6$	contrainte de gestion des surfaces en betterave C

- **Variables de décision**

$x_{r,e,c}$	surface que l'exploitation $e$ alloue à l'activité $c$ dans la région $r$
$A_{r,e}$	agrandissement annuel de l'exploitation $e$ , de la région $r$
$l_{r,e}$	fonction indicatrice de l'exploitation $e$ , de la région $r$ : $\begin{cases} l_{r,e} = 1 & \text{si } e \text{ existe} \\ l_{r,e} = 0 & \text{sinon} \end{cases}$

- **Paramètres**

$S_{r,e}$	SAU de l'exploitation $e$
$T_r$	SAU de la région $r$
$J$	jachère nue (jachère hors cultures énergétiques)
$\pi_{jach}$	part de la jachère non rotationnelle
$\omega_{r,j}$	coefficient de limitation de la surface par famille de culture (maximum agronomique)
$m_{c,k}$	coefficient de la culture $c$ associée aux contraintes rotationnelles
$\sigma_c$	limite de débouché d'une culture en surface
$G_{\min}$	taux de gel minimum
$G_{\max}$	taux de gel maximum

La marge brute totale est maximisée selon la fonction objectif suivante :

$$\left. \begin{aligned} \Phi^+ &= \sum_{r \in R} \sum_{e \in E} \sum_{c \in C} x_{r,e,c} \cdot \mu_{r,e,c} \\ \Phi^- &= \sum_{r \in R} \sum_{e \in E} (-\lambda_{r,e}) \cdot A_{r,e} \\ \Phi &= \Phi^+ + \Phi^- \end{aligned} \right\}$$

**MAX $\Phi$**

• **Sous les contraintes :**

○ l'agrandissement est limité

$$\forall r \in R, \forall e \in E,$$

$$A_{r,e} \leq (l_{r,e} \times a_{r,e})$$

○ la SAU régionale est constante et ne peut être dépassée

$$\forall r \in R,$$

$$\sum_{e \in E} (l_{r,e} \times S_{r,e} + A_{r,e}) \leq T_r$$

en sommant sur  $R$

$$\sum_{r \in R} \sum_{e \in E} (l_{r,e} \times S_{r,e} + A_{r,e}) \leq \sum_{r \in R} T_r$$

○ la surface totale des cultures d'une exploitation est inférieure à sa SAU

$$\forall r \in R, \forall e \in E, \forall c \in c_1,$$

$$\sum_{c \in C} x_{r,e,c} \leq l_{r,e} \times S_{r,e} + A_{r,e}$$

○ chaque famille de culture ne doit pas dépasser une certaine part de la SAU

$$\forall r \in R, \forall e \in E, \forall j \in [1;6],$$

$$\sum_{c_j \in C} x_{r,e,c_j} \leq (S_{r,e} + A_{r,e} - x_{r,e,j} \cdot \pi_{jach}) \cdot \omega_{r,j} \cdot l_{r,e}$$

○ Respect des rotations

$$\forall r \in R, \forall e \in E, \forall k \in K,$$

$$\sum_{c \in C} m_{c,k} \cdot x_{r,e,c} \leq 0$$

○ Certaines cultures sont à débouchés limités en surfaces

$$\forall r \in R, \forall e \in E,$$

$$x_{r,e,c_7} \leq \sigma_{c_7} \cdot l_{r,e}$$

- Certaines cultures sont à débouchés limités en quantités  
 $\forall r \in R, \forall e \in E,$   
 $x_{r,e,c_8} \cdot y_{r,e,c_8} \leq \sigma_{c_8} \cdot l_{r,e}$
- La jachère doit être comprise entre deux proportions de la SAU  
 $\forall r \in R, \forall e \in E,$   
 $\sum_{c_9 \in C} x_{r,e,c_9} + x_{r,e,J} \geq (S_{r,e} + A_{r,e}) \cdot G_{\min}$   
 $\sum_{c_9 \in C} x_{r,e,c_9} + x_{r,e,J} \leq (S_{r,e} + A_{r,e}) \cdot G_{\max}$

## 2.4.2 Discussion sur le modèle MAORIE

### 2.4.2.1 Les problèmes de calage

Afin de vérifier si le modèle reproduit correctement la réalité, il est très important de comparer les surfaces des cultures du modèle avec les surfaces effectivement réalisées. Cette phase de vérification est appelée calage du modèle.

Les résultats obtenus lors de la simulation de l'année de référence vont être comparés à ceux de l'échantillon pour cette même année. C'est la confrontation ces deux sources de résultats différents qui permet de caler le modèle, et donc de supposer que le modèle reproduit correctement la réalité.

La cohérence est observée au niveau régional, et non au niveau de chacune des exploitations. La programmation linéaire est un outil particulièrement sensible à de petites variations, ce qui peut provoquer de grosses variations dans l'assolement à un euro prêt. On suppose donc que la multiplication des cas entraîne une certaine compensation de ces variations brusques.

Un des critères qui est retenu lors du calage est la surface des différentes cultures. Une correspondance exacte entre les surfaces données et les surfaces simulées n'est pas recherchée. En effet, s'il est possible techniquement de le faire, on court alors le risque d'introduire dans le modèle de nombreuses rigidités. Ces rigidités pourraient non seulement être arbitraires, mais elles risqueraient de figer le système agro économique dans la situation de l'année observée, alors que le but même du modèle est de permettre de simuler des changements sur ce système.

### 2.4.2.2 Critiques et limites

La simplification des assolements entraîne une spécialisation des exploitations dans les cultures les plus efficaces économiquement. Le postulat de rationalité économique, modélisé par l'optimisation sur une maximisation du produits brut en fonction des marges brutes par culture ne prend pas correctement en compte un certain nombre de variables importantes pour l'agriculteur lors de ses choix : temps de travail, aversion au risque naturel, aversion au risque de marché, disponibilité foncière... Ces aspects pourraient être pris en compte, mais l'augmentation importante des données nécessaires entraînerait un accroissement important des difficultés liées au paramétrage du modèle.

L'optimisation se fait sur les cultures présentes l'année initiale dans l'exploitation, ce qui exclu l'apparition de nouvelles cultures dans l'assolement. Cette rigidité est importante, et ne permet pas aux exploitants toutes les adaptations possibles à un changement d'environnement.

### 2.4.3 Modélisation des mesures de réduction des engrais azotés

L'introduction des mesures de réduction des engrais azotés a nécessité un certain nombre de modifications du modèle MAORIE. Certaines sont spécifiques à la mesure modélisée, d'autres sont plus générales et sont des conditions obligatoires de la réalisation de la modélisation de mesures concernant les problématiques liées à l'azote.

#### 2.4.3.1 Modifications générales

La modélisation des mesures de réduction des quotas azotés par exploitation, d'échange de quotas et de modification du prix de l'azote nécessitent la présence des paramètres prix et quantité d'azote par culture et par exploitation clairement isolés et modifiables.

##### 2.4.3.1.1 Introduction des quantités d'azote/ha

Le calcul de la marge brute par culture et par exploitation est réalisé par introduction en tant que paramètres des déterminants de cette marge. Les charges variables sont la somme des charges en semences, en produits phytosanitaires, en engrais et en charges de mécanisation spécifiques à certaines cultures. Les charges en engrais comprennent les engrais azotés, potassiques et phosphorés. Les données de l'échantillon donnent les doses de chacun des engrais, ainsi que les charges totales en engrais.

Un bref calcul permet de voir que le prix des engrais est variable selon l'exploitation considérée. Cette variation est liée aux variations d'approvisionnement des exploitants (quantités commandées, mode de livraison, volume de stockage, mode de paiement, saison d'achat)<sup>1</sup>. De plus, la composition des engrais, la teneur en éléments minéraux, et la nature du support de l'engrais sont diverses, et leurs prix ne sont donc pas les mêmes.

Pour pouvoir utiliser par la suite de manière indifférente les quantités ou les valeurs des engrais, il semble important de fixer un prix similaire pour toutes les exploitations de l'échantillon. Il faut donc recalculer les charges en engrais, à prix identique. Ces sont ces charges qui seront prises en compte dans le paramétrage des courbes de production, car le prix influe sur le choix de l'optimum.

Les prix des engrais pour l'année 2000 sont les suivants:

	teneur	€/q	€/unité
N ammonitrate	33.5%	19.82	0.59
N solution	30%	13.42	0.45
P Super triple	45%	23.78	0.53
K Kcl	61%	20.28	0.33

Ces prix sont observés pour des engrais livrés en sacs de 50 kg par quantité inférieure à 5 t.

Nous considérons que l'achat en quantités plus importantes (plus de 10 t), en sac de 500 kg ou en vrac, en morte saison peuvent faire varier ces prix de respectivement 5%, 7% et 8%, soit au total environ 20%. Cela réduit le prix à 80% du prix de base.

La fertilisation azotée réalisée par les agriculteurs en grande culture est une pondération de différentes formes d'engrais. A dire d'expert, les apports se font avec 60% d'ammonitrate et 40% d'azote en solution.

<sup>1</sup> Teissier, 2004

Le montant final des charges en engrais par culture est donc :

$$CV_f = [Q_N \cdot (0.6 \cdot P_{Na} + 0.4 \cdot P_{Ns}) + Q_P \cdot P_{Pst} + Q_K \cdot P_{KKcl}] \cdot 0.80$$

avec :

$CV_f$  charges variables en engrais

$Q_N$  Quantité d'azote par hectare

$Q_P$  Quantité de phosphore par hectare

$Q_K$  Quantité de potassium par hectare

$P_{Na}$  Prix de l'unité d'azote sous forme ammonitrate

$P_{Ns}$  Prix de l'unité d'azote sous forme solution

$P_{Pst}$  Prix de l'unité de phosphore sous forme Super triple

$P_{KKcl}$  Prix de l'unité de potassium sous forme Chlorure de potassium

Le calcul des charges en engrais est ensuite comparé aux données initiales de l'échantillon.

	moyenne	Ecart type
Charges engrais échantillon (en €/ha)	120	44
Charges engrais recalculées (en €/ha)	120	31

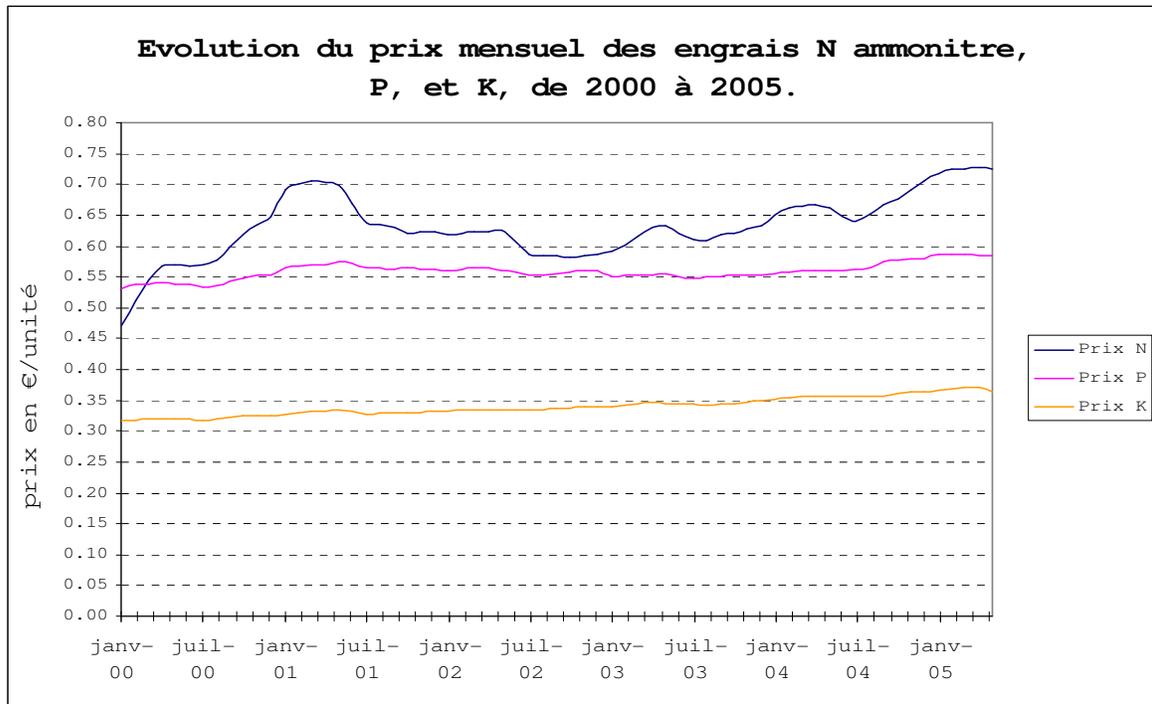
La moyenne des charges calculées semble proche de celle de l'échantillon.

On peut observer une diminution de la variabilité de l'échantillon, due à une certaine uniformisation des prix d'achat des engrais des exploitations.

#### **2.4.3.1.2 Introduction des prix tendanciels des engrais**

L'évolution du prix des engrais doit être prise en compte dans la modélisation. Dans un premier temps, la série des prix mensuels des engrais a été réalisée sur les 5 dernières années (2000-2005)<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Agreste Conjoncture, 2000-2005



La série a été choisie sur une durée de 5 ans, pour tenir compte de manière importante des tendances de ces dernières années. Pour pouvoir extrapoler la tendance actuelle dans les années à venir, des modèles d'ajustement ont été réalisés pour le phosphore et le potassium.

Le modèle d'ajustement linéaire du prix mensuel de l'unité de phosphore est le suivant :

$$Y = 0.0005 \cdot X + 0.5450$$

avec  $Y$  le prix de l'unité de phosphore, et  $X$  l'indice année.

Le coefficient de détermination de cette relation est  $R^2 = 0.376$

La probabilité associée au test de Fischer est inférieure à  $6^E-08$ . La relation linéaire est donc considérée comme significative, et le modèle linéaire de prédiction est retenu pour le prix de l'unité de phosphore, bien que la valeur relativement faible du  $R^2$  limite la qualité des prédictions.

Le modèle d'ajustement linéaire du prix mensuel de l'unité de potassium est le suivant :

$$Y = 0.0008 \cdot X + 0.3146$$

Le coefficient de détermination de cette relation est  $R^2 = 0.951$

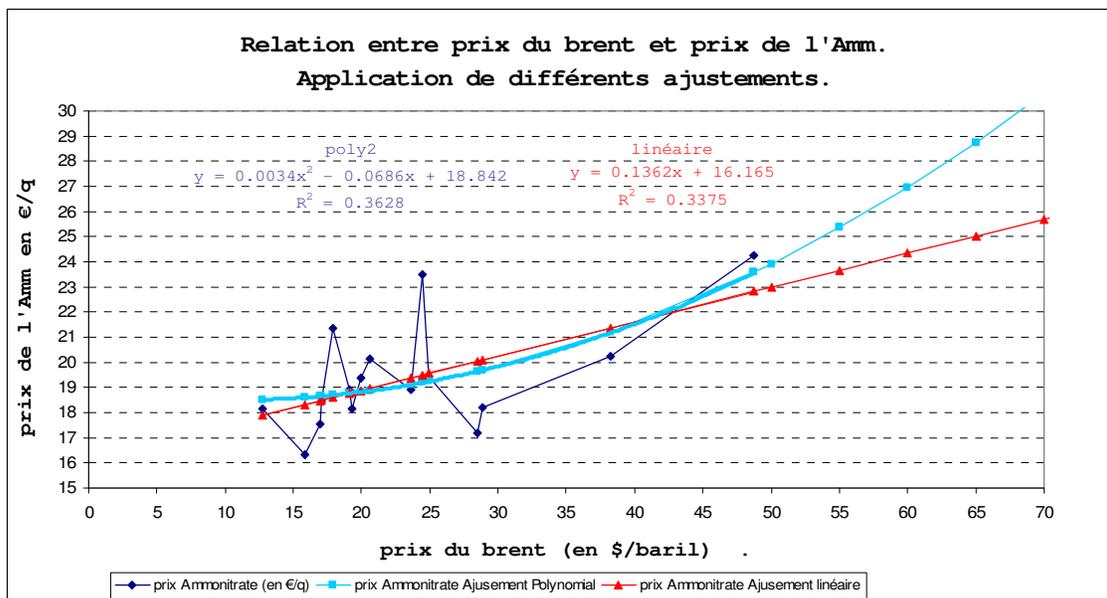
La probabilité associée au test de Fischer est inférieure à  $7^E-43$ . La relation linéaire est très significative, et le modèle linéaire de prédiction est retenu pour le prix de l'unité de potassium.

Le prix des engrais azotés dépend du prix du pétrole. La sélection de scénarii tendanciels de prix des engrais azotés ne peut donc être considérée comme une prolongation du trend actuel, et a donc été réalisée sous différentes hypothèses d'évolution du cours du pétrole. On recherche dans un premier temps une relation entre le prix du baril de Brent (en \$/baril) et le prix de l'ammonitrate (en €/q).

Le modèle de régression linéaire du prix de l'engrais sur le prix du pétrole est :

$$Y = 0.1362 \cdot X + 16.1654$$

Le coefficient de détermination de cette relation est  $R^2 = 0.3375$   
 La probabilité associée au test de Fischer est inférieure à 0.0183. La relation linéaire est donc considérée comme significative. Le modèle linéaire de prédiction est intéressant pour évaluer le prix de l'engrais azoté en fonction du prix du pétrole. D'autres ajustements ont été testés pour essayer d'améliorer la valeur de prédiction du modèle :



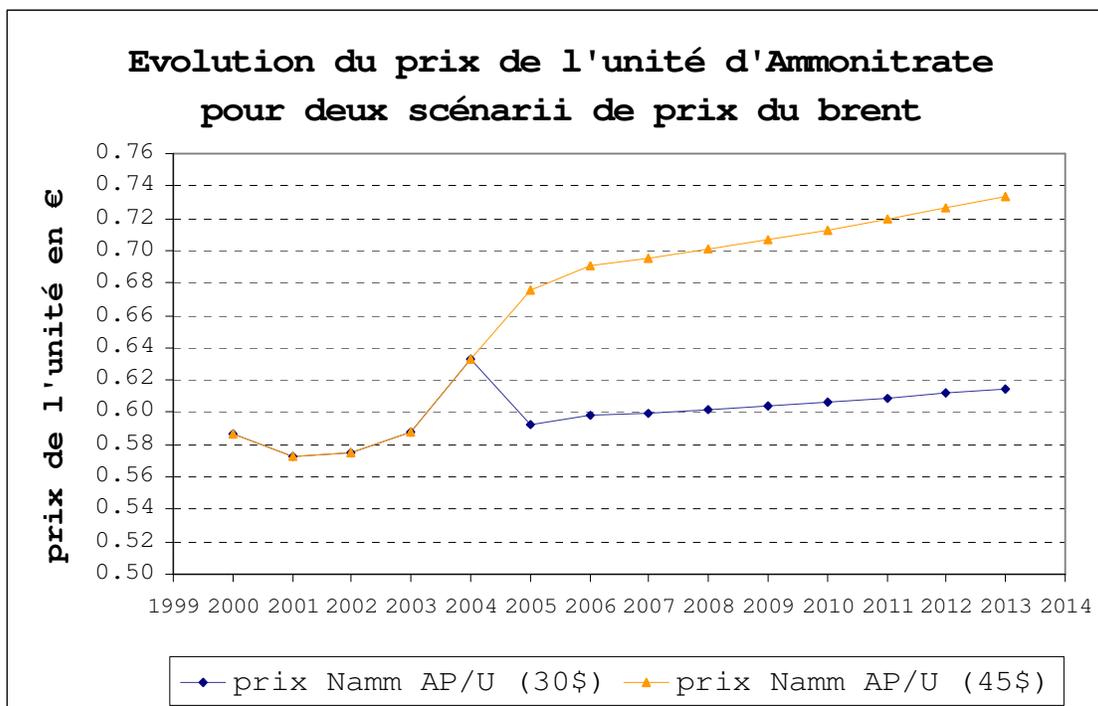
C'est finalement l'ajustement polynomial qui a été retenu pour modéliser la relation entre le prix de l'engrais azoté et le prix du pétrole.

Le niveau du prix du pétrole dans les années à venir est difficile à prévoir. Certains travaux retiennent l'option d'un baril à 30\$ pour établir des scénarii tendanciels à l'horizon 2030<sup>1</sup>. Cependant, avec un cours du Brent à 64\$ le baril en août 2005<sup>2</sup>, un scénario avec un prix du pétrole plus élevé peut être intéressant.

Les deux options de prix choisies sont donc 30\$ et 45\$ le baril de Brent à partir de 2005.

<sup>1</sup> Direction générale de l'énergie et des matières premières, Observatoire de l'énergie, 2004

<sup>2</sup> DGEMP-DIREM, Les statistiques sur le pétrole et les produits pétroliers, octobre 2005



L'écart de prix entre les deux scénarii pourrait être à l'origine d'une variabilité des résultats du modèle MAORIE. La relation entre dose d'azote/ha et rendement dépend du rapport des prix des inputs et des outputs. Le choix du prix de l'azote y est donc également influent et sera testé dans les simulations.

#### **2.4.3.1.3 Introduction des nouveaux itinéraires techniques**

Par la méthode des courbes de production, nous avons obtenu la relation entre la dose d'azote/ha et le rendement pour les 6 principales cultures modélisées. Cette relation a été discrétisée selon trois niveaux d'azote : Le niveau actuel, un niveau à -25% de la dose actuelle dénommé « semi extensif », et un niveau à -50% de la dose actuelle dénommé « extensif ». Le terme extensif a été préféré au terme extensif, car les itinéraires techniques obtenus après diminution de la fertilisation azotée restent intensifs.

Ces nouveaux itinéraires techniques sont considérés dans le modèle comme de nouvelles activités. Le modèle compte donc 12 activités supplémentaires à partir de l'année 2006, année de mise en place simulée de la mesure de réduction des engrais azotés.

Les nouvelles charges variables et les nouveaux rendements sont introduits dans le calcul de la marge brute par culture et par exploitation.

#### **2.4.3.2 Quotas azotés par exploitation et marché des quotas**

##### **2.4.3.2.1 Le quota par exploitation**

La mesure de réduction des quantités d'engrais azotés est simulée à partir de 2006. Le montant du quota azoté initial par exploitation est fixé par référence historique. L'année 2006 est considérée comme l'année de référence sans réforme. L'assolement optimisé de 2006 sert donc de référence pour le calcul des doses d'azote utilisées par l'agriculteur. Le quota initial alloué à chaque exploitation est calculé de la manière suivante :

$$Q_N = \sum_c (x_c \cdot q_{N_c})$$

avec :

$Q_N$  le quota d'engrais azoté en unité d'azote de l'exploitation

$x_c$  la surface de chaque culture l'année 2006

$q_{N_c}$  la quantité d'engrais azoté apportée par hectare de culture

$Q_N$  est ensuite réduit proportionnellement selon les scénarii de diminution des quantités d'engrais. C'est cette valeur qui est contraignante pour l'exploitant dans le choix de son assolement.

Cette contrainte de quantité d'azote est de la forme :

$$\sum_c (x_c \cdot q_{N_c}) \leq \tau \cdot Q_N$$

avec

$\tau$  le taux de réduction des apports envisagé.

La valeur duale liée à cette contrainte permet de connaître pour chacune des exploitations le produit marginal d'une unité d'azote, c'est-à-dire le niveau de valorisation d'une unité d'azote supplémentaire au delà du prix de l'unité qui figure dans la fonction économique du modèle.

#### 2.4.3.2.2 L'échange de quotas

Pour modéliser un marché d'échange des quotas azotés, il faut permettre aux exploitants d'acheter ou de vendre du quota. Il faut donc créer deux activités nouvelles : achatN qui représente l'achat possible de quota azoté, et venteN l'activité de vente.

La contrainte de quota d'azote devient donc:

$$\sum_c (x_c \cdot q_{N_c}) \leq \tau \cdot Q_N + x_{achatN} - x_{venteN}$$

avec

$x_{achatN}$  la quantité d'engrais azoté achetée par l'agriculteur

$x_{venteN}$  la quantité d'engrais azoté vendue par l'agriculteur

L'équilibre doit être respecté au niveau global entre les quantités achetées et les quantités vendues. Une contrainte d'équilibre de marché est donc ajoutée.

$$\sum_e (x_{e,achatN} - x_{e,venteN}) \leq 0$$

avec  $e$  l'indice exploitation.

L'autorisation d'échange permet aux exploitations ayant une bonne valorisation marginale de l'azote d'en acheter aux exploitations ayant une valorisation moins élevée. La duale observé sur la contrainte de quota par exploitation est alors la même pour tous, et représente le coût supplémentaire auquel les agriculteurs qui valorisent le mieux seraient prêt à acheter l'unité d'azote. Le prix d'équilibre du marché d'échange est donc cette valeur duale ajoutée au prix initial de l'unité d'azote.

### 2.4.3.3 Quota régional et taxe sur l'azote

Etudier un niveau de taxe sur l'azote revient à déterminer un niveau de prix de l'unité d'azote qui entraîne une diminution de sa consommation pour atteindre un niveau donné.

En calculant un quota régional comme somme des quotas par exploitations, et en lui imposant une réduction, les exploitations qui valorisent le mieux l'azote vont conserver leur niveau de fertilisation, alors que les autres exploitations vont avoir tendance à modifier leurs système de cultures. La valeur duale liée à cette contrainte régionale nous permet donc de connaître le montant de la valorisation marginale de l'azote, c'est-à-dire la valeur additionnelle de l'unité qui correspond au niveau de réduction des quantités fixées ; Ajouté au prix initial de l'azote, on obtient le prix nécessaire à la diminution de quantité choisie. La valeur duale donne le niveau de la taxe sur l'azote à mettre en place.

Cette contrainte régionale de quota s'écrit :

$$\sum_{e,c} (x_{e,c} \cdot q_{N_{e,c}}) \leq \tau \cdot \sum_e Q_{N_e}$$

avec  $Q_{N_e}$  le quota azoté par exploitation

Comme dans le cas du quota par exploitation,  $\tau$  peut être choisi selon le scénario de réduction étudié.

## **3 Scénarios envisagés et résultats**

### **3.1 Cadre général des simulations**

Les effets des mesures de réduction de la consommation d'engrais azotés sur les assolements, sur le niveau d'intensification des cultures (modification des itinéraires techniques utilisés) et sur le revenu des agriculteurs vont être simulés puis analysés.

Les simulations vont être effectuées sur des exploitations de grandes cultures, toutes issues de la base de données de la sonde RICA pour le département de Seine et Marne. On ne peut pas considérer cet échantillon comme représentatif du département. On ne cherchera donc pas à extrapoler les résultats et analyses obtenus.

Les simulations n'intègrent pas d'exploitations de polyculture élevage ou d'exploitations d'élevage. Il n'y a pas de consommation d'effluents d'élevage ni à l'intérieur des exploitations traitées, ni par échange entre exploitations. Les engrais organiques ne sont donc pas pris en compte dans les apports possibles de nutriments azotés.

Les mécanismes d'évolution des structures ont été désactivés car suite à l'agrandissement, il aurait fallu réaliser un transfert de fertilisation et donc du quota initial, difficile à réaliser avec ce modèle.

Les principales simulations seront donc basées sur une contrainte de réduction du quota azoté par exploitation (-10% et -30%), et sur une réduction de la consommation régionale (-10% et -30%). La sensibilité des résultats sera testée selon la variation du prix de l'azote. On regardera également l'influence d'une augmentation possible des protéagineux dans l'assolement, ces cultures ne demandant pas d'apport en azote.

### **3.2 La solution de référence**

L'horizon retenu pour la mise en place des mesures de réduction des engrais azotés est 2006, c'est-à-dire une fois mis en place le découplage partiel prévu par le compromis de Luxembourg. Cette solution de référence est déterminée pour un prix du baril de Brent de 30\$. Le choix de l'évolution du prix du pétrole influe sur le prix de l'unité d'azote (l'unité d'azote est estimée à 0.548€ pour un baril de Brent à 30\$, et à 0.633€ pour un baril à 45\$).

Les données suivantes issues de l'optimisation 2006 vont servir de référence pour analyser les effets des mesures de réduction d'intrants envisagés par la suite

#### **3.2.1 Prix de vente des cultures**

Les prix retenus sont issus d'une extrapolation exponentielle des prix passés<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> FIRS, 2002 ; RICA, 1993-2001 ; Sondes SCEES, 2000-2003

### Prix producteur des produits en 2006 (en €/t)

Betterave A	46.72
Betterave B	33.37
Betterave C	9.00
Betterave éthanol	20.25
Betterave Alcool	20.11
Blé	86.20
Blé éthanol	81.90
Colza	194.30
Colza ester	194.30
Féverole	147.90
Maïs	79.70
Escourgeon	85.90
Orge de printemps	110.60
Pois	116.70
Tournesol	201.40
Tournesol Industriel	172.90

### 3.2.2 Les rendements

Le rendement de l'année de référence (année 2006) est une extrapolation du rendement individuel de chaque culture en 2000, auquel on a appliqué la tendance linéaire croissante des rendements départementaux calculés sur 10 ans, la même pour toutes les exploitations. Les rendements sont corrigés des variations climatiques. 20% du produit brut supplémentaire apporté par ces progrès techniques (génétiques et agronomiques) est absorbé par une augmentation des dépenses en intrants (engrais et produits phytosanitaires). Les rendements des cultures ayant différents itinéraires techniques sont connus pour 2006. Cependant, vu l'hypothèse de l'optimalité économique des niveaux d'intrants choisis par l'exploitant agricole, ces nouveaux itinéraires techniques n'apparaissent pas sans resserrement de la contrainte de quantité d'engrais azotés consommés.

### Rendements moyens des cultures en 2006 (en q/ha)

	ITK initial	ITK semi extensif	ITK extensif
Betterave A	792.2	759.2	669.4
Betterave B	792.2	757.8	667.6
Betterave C, éthanol, alcool	792.2	-	-
Blé	84.5	78.7	68.4
Blé de bon précédent	87.5	81.7	71.4
Blé sur Blé	79.5	73.7	63.4
Colza	31.8	29.5	24.8
Féverole	47.8	-	-
Maïs	102.3	96.0	82.1
Escourgeon	69.5	65.2	57.8
Orge de printemps	61.3	58.2	51.5
Pois	47.4	-	-
Tournesol	31.4	-	-

### 3.2.3 Les marges brutes

Les proportions de chacune des cultures ou de groupes de cultures sont issues de l'optimisation sous contrainte. Ce sont les rapports de marges brutes qui déterminent en grande partie les choix cultureux réalisés. Les marges brutes moyennes par culture de l'optimisation 2006 sont présentées dans le tableau suivant en ordre décroissant.

**Marges brutes des cultures pour l'année 2006 (en €/ha)**

Betterave A	2525
Betterave B	1500
Féverole	709
Maïs	562
Colza ester	541
Orge de printemps	531
Betterave Alcool	506
Colza	502
Pois	454
Blé	452
Betterave éthanol	438
Escourgeon	385
Blé éthanol	243
Tournesol	235
Tournesol Industriel	133
Betterave C	-369

On voit clairement se détacher les marges brutes de la betterave A et B qui sont à des niveaux beaucoup plus élevés. La féverole a elle aussi une marge brute plus importante que les cultures les plus courantes en surface. Cependant, les betteraves comme la féverole sont des cultures soumises à des contraintes de quotas et de débouché, et ne peuvent donc pas se développer fortement malgré leur avantage de marge brute important.

Les cultures de colza, orge de printemps, blé et pois ont des marges brutes relativement proches. Ces valeurs sont des valeurs moyennes sur l'ensemble de l'échantillon, l'ordre peut donc différer selon l'exploitation considérée. L'escourgeon se détache légèrement de ce groupe central.

### 3.2.4 Les surfaces

L'assolement issu de l'optimisation en 2006 nous fournit les valeurs de la variable de surface d'ajustement de la maximisation :

### Surfaces des cultures en 2006 (en % de la SAU totale)

Blé	44%
Oléagineux	18%
Protéagineux	10%
Orges	10%
Jachère nue	7%
Betterave	6%
Maïs	4%

Céréales	54%
Têtes d'assolement	46%

La comparaison de cette répartition des surfaces par culture de l'année 2006 optimisée à celle de l'année observée 2000 montre une nette régression des orges au bénéfice des oléo-protéagineux. Toutefois, la modification des assolements entre l'année 2000 optimisée et l'année 2006 est faible. Le décalage provient en fait du calage du modèle de l'année 2000. Les surfaces en orge d'hiver ne sont pas correctement simulées. C'est un problème récurrent du modèle utilisé. Les marges brutes en colza et en pois sont nettement plus élevées que celle de l'orge d'hiver, ce qui explique les surfaces plus importantes en oléo-protéagineux lors des optimisations réalisées. L'intérêt de l'agriculteur pour l'orge d'hiver ne semble pas répondre au critère de rationalité économique, et demande à être plus finement étudié<sup>1</sup>.

### 3.2.5 Les revenus

Le niveau de revenu moyen de l'année 2006 va servir de référence pour évaluer l'impact des mesures de réduction d'intrants sur le revenu des agriculteurs. Il est cependant intéressant de comparer ce niveau moyen au niveau moyen réel de l'échantillon issu du RICA.

Une comparaison entre les revenus de l'année 2000 réelle et optimisée permet de mesurer le décalage introduit par la modélisation. La comparaison entre l'année 2000 optimisée et l'année 2006 optimisée met en évidence l'évolution du niveau moyen de revenu agricole dans le temps.

Les données de l'échantillon indiquent un revenu agricole moyen de 254 € par hectare de SAU.

L'optimisation de cette même année donne un revenu agricole moyen de 165€/ha.

Deux raisons principales permettent d'expliquer cette différence de 89€/ha:

- Le calcul de la MSA est réalisé dans le modèle à posteriori sur le revenu de l'exploitant. Le taux appliqué est de 40%. En réalité, ce taux s'applique sur le revenu fiscal et non sur un revenu économique. Ce taux est donc certainement surestimé, et bien que très variable en fonction de l'exploitation considérée, le fixer à 30% semblerait plus juste. Cette variation du taux de MSA permet à elle seule d'expliquer 16€ de différence et ramène le revenu moyen/ha optimisé à 181€/ha et la différence à 73€/ha.

---

<sup>1</sup> cf. Annexe 4

- Une étude menée sur les régions betteravières<sup>1</sup> montre que pour un revenu agricole moyen de 260€/ha, 174€/ha sont issus des grandes cultures, et 86€/ha de produits divers. Les similitudes des systèmes de production de grandes cultures entre ces régions et la région étudiée permet d'estimer que les revenus issus des produits divers peuvent justifier la différence de 73€/ha restante. La composition de ces produits divers est détaillée en annexe<sup>2</sup>.

### **Bilan des niveaux des revenus agricoles (en €/ha de SAU)**

2000 observé	254
2000 optimisé	165
2006 optimisé	96

L'optimisation de 2006 montre un niveau de revenu de 96€/ha, soit 69€ de moins qu'en 2000.

Le revenu moyen par exploitation de l'échantillon est de 11848€.

Cette chute importante du revenu est principalement due à la diminution des niveaux de prix des produits agricoles. La réduction des primes sur les oléo protéagineux au niveau des primes céréales a aussi participé de manière importante à cette chute de revenu.

## **3.3 Les scénarii étudiés**

### **3.3.1 Diminution du quota azoté par exploitation (-10%, -30%)**

Ces scénarii portent sur la réduction de la quantité d'azote consommée par exploitation. Le scénario « -10% » permet de se rendre compte de l'impact d'une réduction assez faible des quantités utilisées. Le scénario « -30% » est une hypothèse beaucoup plus astreignante pour l'agriculteur, qui devra modifier son système de culture de manière plus importante, et qui subira des pertes de revenus sensibles.

L'utilisation de quantités d'azote plus faible que celles fixées à l'optimum économique va contraindre le système. La valeur duale obtenue pour chacune des exploitations sur cette contrainte est égale à la valorisation marginale d'une unité d'azote supplémentaire. La courbe des valeurs duales des exploitations de l'échantillon sur cette contrainte permet d'analyser la dispersion des valorisations marginales de l'azote.

Les effets sur les assolements, ainsi que sur les modifications des itinéraires techniques appliqués seront analysés. L'impact sur les revenus est également observé, en comparaison avec l'année de référence (année de l'optimisation 2006, sans réforme).

### **3.3.2 Simulation d'un marché des quotas, micromarché avec prix d'équilibre**

Les deux scénarii « -10% » et « -30% » sont ensuite modifiés. On autorise l'échange des quotas entre exploitations. Les agriculteurs valorisant le mieux l'azote sur leur exploitation ont donc la possibilité d'acheter des unités aux agriculteurs qui valorisent moins bien leurs engrais azotés. La cession de ces quotas procure un gain de revenu pour les exploitations. Grâce à l'introduction de cette souplesse, les exploitations achètent ou vendent tant qu'il y a

<sup>1</sup> Sourie, Millet, Guindé, 2004

<sup>2</sup> cf. Annexe 5

intérêt à l'échange. Toutes ont alors la même valeur duale, valorisation marginale de l'unité d'azote. Cette valeur marginale ajoutée au prix initial de l'unité d'azote utilisé pour le calcul des marges brutes est le prix d'équilibre du micromarché d'échange. L'instauration de ce marché doit théoriquement permettre de réduire les pertes de revenu des agriculteurs par une meilleure allocation des facteurs de production.

### **3.3.3 Diminution d'un quota régional de -10% et -30%, et détermination du niveau de taxe nécessaire à la réduction des quantités d'azote.**

La fixation d'une taxe sur l'azote vise à augmenter son prix pour diminuer la quantité utilisée. Une taxe sur les apports d'azote peut s'avérer efficace pour limiter une pollution si l'élasticité de la demande d'azote à son prix est assez élevée. Cette question reste très controversée. Certaines études font état d'une élasticité de la demande au prix élevée et croissante avec le temps<sup>1</sup>, d'autres sont beaucoup plus pessimistes, du moins à court terme<sup>2</sup>. Avec une élasticité de la demande au prix suffisamment forte, on peut imaginer qu'une taxe assez élevée puisse entraîner une diminution des fuites d'azote. Un doublement du prix de l'azote pourrait se traduire par une diminution de 20% des quantités consommées<sup>3</sup>.

La modélisation d'une contrainte régionale portant sur la consommation totale en azote des exploitations de l'échantillon permet d'observer l'impact de l'instauration de cette taxe sur les systèmes de cultures et les revenus des agriculteurs.

Un quota régional est donc calculé, en sommant les quotas de chacune des exploitations. La contrainte régionale devient contraignante lorsqu'on applique à ce quota une réduction de -10% puis -30%. Pour observer l'effet du resserrement de cette contrainte, il faut bien entendu supprimer les contraintes individuelles de quantité d'azote dans chaque exploitation. La valeur duale sur la contrainte de quota régional représente la valeur de la taxe nécessaire à la réduction des quantités imposées. Cette valeur est identique à celle obtenue par la modélisation du marché des quotas. Les impacts sur les systèmes de culture sont eux aussi identiques. L'impact sur le revenu est calculé en appliquant la valeur de la taxe à chaque unité d'azote consommée par les agriculteurs.

## **3.4 Résultats obtenus**

### **3.4.1 Impacts sur les surfaces par cultures**

Pour analyser les impacts des mesures envisagées sur les assolements des exploitations, on regarde d'abord les variations de surfaces des différentes cultures.

---

<sup>1</sup> Armand-Madelin V., 1992

<sup>2</sup> England, 1986 ; Rude et al., 1989

<sup>3</sup> Le Roch et al., 1996

**Variation de la part des surfaces des cultures dans les différents scénarii envisagés  
(en % de variation)**

	-10% par exploitation	-30% par exploitation
Blé tendre	-1.1%	-3.4%
Oléagineux	-0.2%	-0.6%
Protéagineux	0.5%	0.7%
Orges	0.6%	1.5%
Jachère nue	0.3%	1.5%
Betterave	0.0%	0.1%
Maïs	0.0%	0.0%
Total	0.0%	-0.1%

Les surfaces des cultures sont très peu modifiées par les changements de scénarii. On observe une légère diminution de la surface en blé tendre, en oléagineux et une augmentation des protéagineux, et des orges. Cela paraît logique, puisque le blé et le colza sont les cultures les plus consommatrices en azote. On peut observer une légère augmentation de la surface en jachère obligatoire.

La culture des protéagineux ne demandant pas d'apport en azote, il est intéressant de regarder les résultats d'une autorisation de surface plus importante de ces cultures. Initialement limitées à 15% de la surface, une simulation à 20% de la surface a été réalisée, surface maximale car le pois ne revient en moyenne qu'une année sur cinq dans les rotations.

**Impact d'une augmentation de l'autorisation des surfaces en protéagineux (en % de variation)**

	-30% par exploitation, protéagineux < 15%	-30% par exploitation, protéagineux < 20%
Blé tendre	-3.4%	-4.0%
Oléagineux	-0.6%	-2.6%
Protéagineux	0.7%	4.3%
Orges	1.5%	1.2%
Jachère nue	1.5%	0.9%
Betterave	0.1%	0.1%
Maïs	0.0%	0.0%
Total	-0.1%	-0.1%

Les surfaces en protéagineux passent de 0.7% à 4.3% quand on augmente la surface autorisée de 15% à 20% de la SAU. Il y a donc un réel intérêt à la culture des protéagineux dans un contexte de réduction des consommations d'azote. La référence étant fixée avec une contrainte protéagineux à 15% de la SAU, les résultats de la simulation à 20% signifieraient que les agriculteurs pourraient être tentés de repousser les limites agronomiques pesant sur les protéagineux, pour optimiser leur système. De plus, certains agriculteurs qui n'en faisaient pas ou qui auraient arrêté pourraient cultiver à nouveau le pois dans ce contexte différent, ce qui accentue encore la sous-estimation des surfaces en pois.

Pour regarder si une modification du cours du pétrole, et donc du prix de l'azote modifie les assolements, un scénario « Baril de Brent à 45\$ » au lieu de 30\$ a été testé. Le prix du pétrole

n'a pas d'effet sur les assolements, lors de la simulation d'une modification des quantités d'intrants azotés utilisées.

L'introduction de l'autorisation de l'échange des quotas fertilisants ne modifie pas non plus l'allocation des surfaces par culture, quelque soit le scénario de réduction d'azote envisagé.

L'impact des scénarii étudiés sur la distribution des surfaces des cultures est très faible dans tous les cas. Seule une modification de la contrainte de maximum de surface en protéagineux peut modifier sensiblement les assolements. Une mise en place de mesures de restriction des quantités d'engrais utilisés ne devrait donc pas modifier notablement les assolements actuels.

### 3.4.2 Impacts sur les itinéraires techniques des cultures

Les six cultures principales de l'échantillon peuvent être menées selon trois itinéraires techniques différents : initial, semi-extensifié, extensifié. Il est intéressant d'observer les cultures qui sont désintensifiées les premières, et celles qui conservent leur itinéraire technique d'origine.

#### Impact du scénario « -10% par exploitation » sur les itinéraires techniques pratiqués (en % de la surface de la culture)

Cultures	ITK initial	ITK semi-extensifié	ITK extensifié
Betteraves A et B	91%	9%	0%
Blé tendre	37%	62%	1%
Colza	90%	10%	0%
Maïs	100%	0%	0%
Escourgeon	64%	36%	0%
Orge de printemps	80%	20%	0%

Dans le cas d'une diminution des consommations d'engrais azoté de 10% par exploitation, on observe une semi extensification des céréales, très marquée pour le blé tendre puisque 62% de la surface cultivée est concernée. La mise en œuvre d'une extensification plus poussée n'est pas nécessaire.

#### Impact du scénario « -30% par exploitation » sur les itinéraires techniques pratiqués (en % de la surface de la culture)

Cultures	ITK initial	ITK semi-extensifié	ITK extensifié
Betteraves A et B	55%	43%	2%
Blé tendre	1%	63%	36%
Colza	4%	91%	5%
Maïs	32%	68%	0%
Escourgeon	0%	78%	22%
Orge de printemps	25%	74%	1%

Une restriction plus poussée des engrais azotés prolonge le phénomène précédemment observé. L'extensification des céréales est accentuée, et plus particulièrement celle du blé tendre, dont 63% des surfaces sont cultivées en semi-extensifié et 36% en extensif, l'itinéraire technique actuel étant abandonné. L'escourgeon passe à 78% en semi-extensifié, et 22% en

extensifié. Le colza, qui conservait son itinéraire technique initial avec un scénario « -10% » passe quasi totalement en semi-extensifié.

On remarque une bonne résistance à l'extensification de la betterave et du maïs. La marge très élevée de la betterave explique la valorisation élevée de l'unité d'azote de cette culture. La pente de la courbe de production du maïs est importante. Le maïs ayant une marge brute assez élevée, il est logique qu'une chute de la fertilisation de cette culture entraîne une perte de revenu importante, qui limite l'extensification.

Sur l'ensemble des exploitations de l'échantillon, on peut regarder quelles sont les variables qui poussent les exploitations à extensifier. Il n'y a pas de relation entre le niveau d'extensification et la SAU ; Le nombre de cultures présentes sur l'exploitation ne joue pas un rôle important. Les niveaux de rendement et de marge brute du blé ne semblent pas non plus jouer un rôle majeur.

Cependant, il existe une liaison entre la dose initiale d'azote à l'hectare de blé et la tendance à l'extensification. Les exploitations qui ont le niveau de fertilisation du blé le moins élevé sont celles qui extensifient le moins (voire pas du tout pour le scénario « -10% »). Ce sont les exploitations qui valorisent le mieux l'azote sur le blé, car il n'y a pas de liaison entre le niveau d'azote et le rendement de mise en évidence dans cet échantillon. Les exploitations les moins intensives dans leurs pratiques initiales sont donc les moins touchées par la mesure de réduction d'azote.

### **3.4.3 Impact sur le revenu des exploitants**

Une modification des rendements des cultures liée à la réduction de la fertilisation entraîne une diminution du revenu des agriculteurs. Cette réduction est variable selon les scénarii considérés.

#### **3.4.3.1 Scénario « -10% par exploitation »**

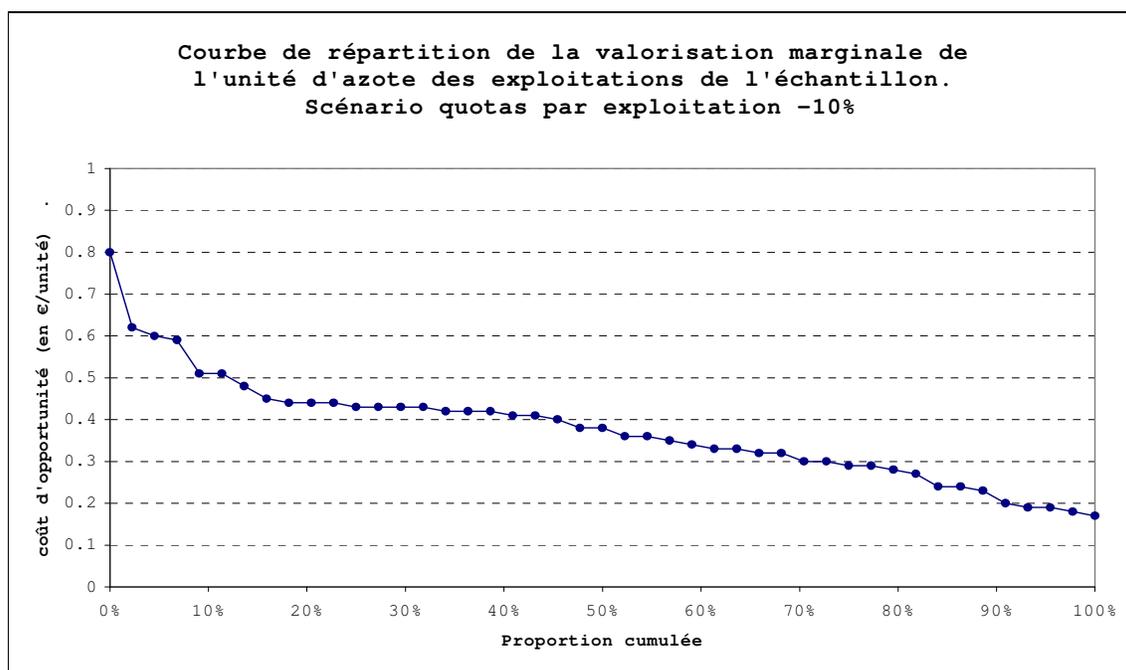
La réduction de 10% du quota azoté autorisé par exploitation a un impact assez faible sur le revenu des exploitants. En moyenne, le revenu par hectare de SAU passe de 98€/ha à 94€/ha, soit une perte moyenne de 4€/ha. 80% des exploitations perdent moins de 5€/ha. Les 20% restantes perdent entre 5 et 12€/ha.

L'introduction de l'autorisation d'échange permet de ramener cette perte de revenu à 3€/ha.

### Effet du scénario « -10% par exploitation » sur le revenu des exploitations

	revenu moyen par exploitation (en €)	revenu moyen par ha de SAU (en €/ha)
revenu de référence	11848	<b>98</b>
scénario "-10% par exploitation	11345	<b>94</b>
Variation	<b>-4%</b>	<b>-4</b>
scénario "-10% par exploitation, avec échange	11437	<b>95</b>
Variation	<b>-3%</b>	<b>-3</b>

Une observation des valorisations marginales de l'unité d'azote des exploitations permet d'avoir une idée du prix d'équilibre d'un éventuel marché des quotas.



La modélisation du marché d'échange permet de connaître plus précisément la valeur d'échange de l'unité d'azote

L'autorisation d'échange ne semble pas avoir dans ce cas un grand intérêt. L'unité d'azote s'échangerait à 0.96€ sur un micromarché des quotas, soit 0.41€ de plus que sur le marché actuel. Les volumes d'échange resteraient relativement faibles, de l'ordre de 4% des quantités totales.

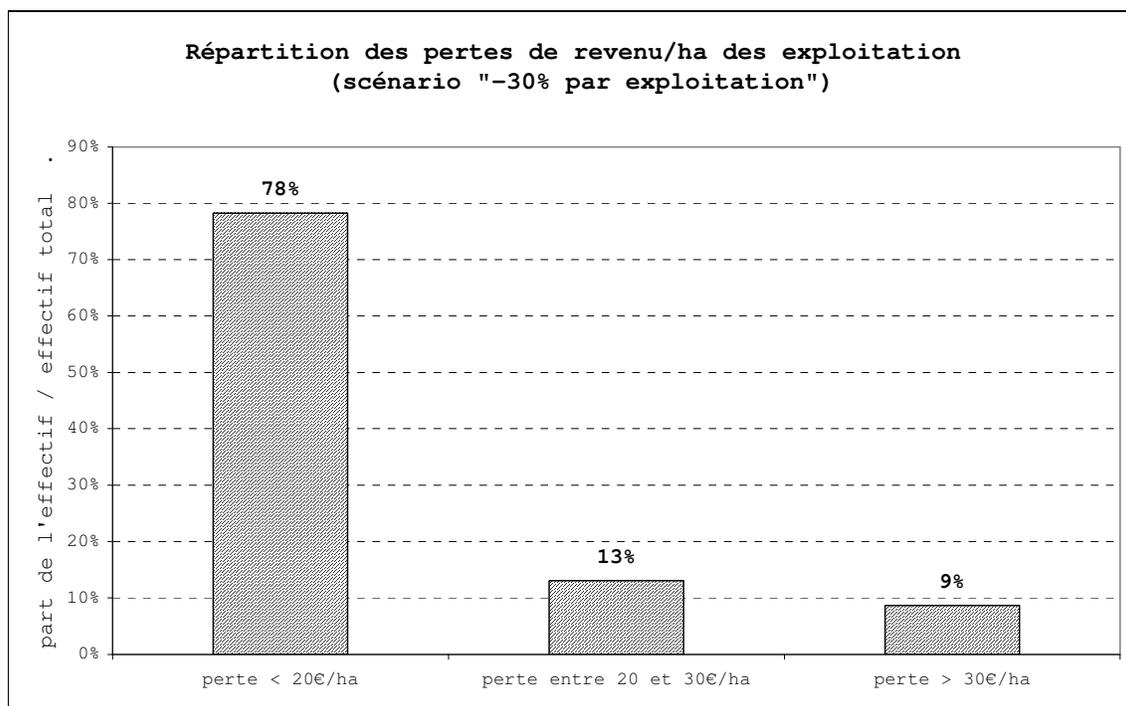
### 3.4.3.2 Scénario « -30% par exploitation »

Une réduction plus importante des fertilisants autorisés provoque une réduction plus forte du revenu agricole des exploitants.

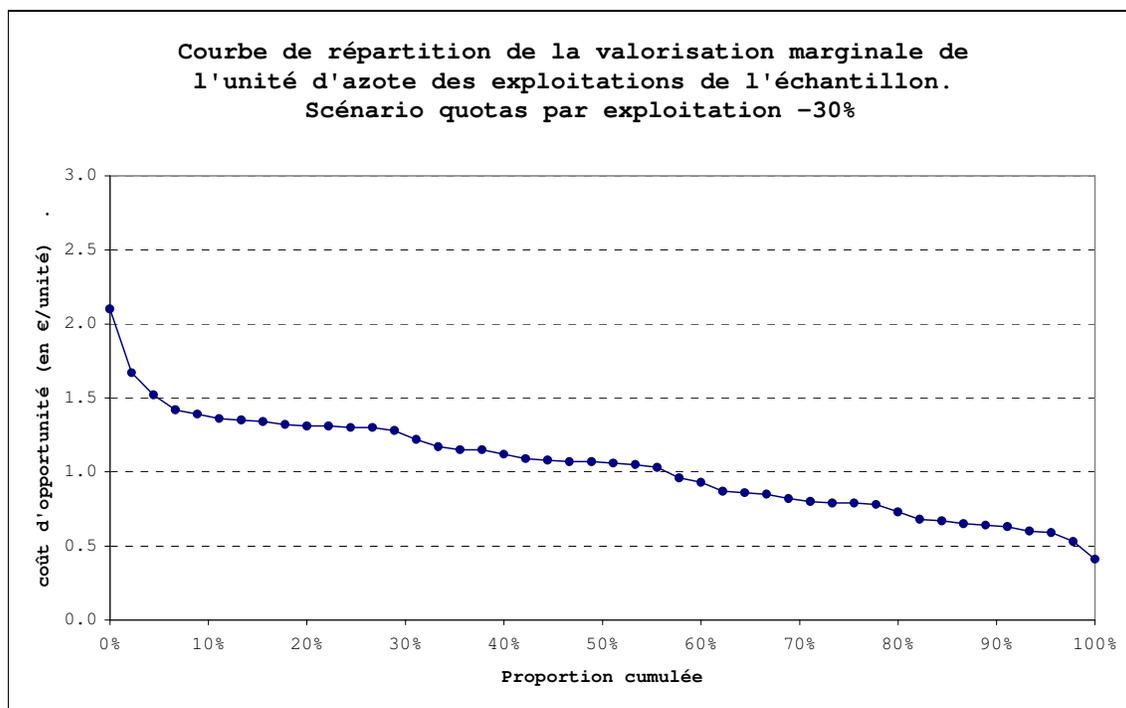
#### Effet du scénario « -30% par exploitation » sur le revenu des exploitations

	revenu moyen par exploitation (en €)	revenu moyen par ha de SAU (en €/ha)
revenu de référence	11848	<b>98</b>
scénario "-30% par exploitation"	9655	<b>80</b>
Variation	<b>-19%</b>	<b>-18</b>
scénario "-30% par exploitation, avec échange"	9902	<b>82</b>
Variation	<b>-16%</b>	<b>-16</b>

La chute de revenu moyen passe de 4% à 19% entre une diminution du quota de -10% et une diminution de -30%. 78% des exploitations perdent moins de 20€/ha, 13% entre 20 et 30€/ha, et 9% entre 30 et 40€/ha.



Cette diminution représente une perte moyenne de 2192€ par exploitation et par an.  
 La courbe de répartition de la valorisation marginale de l'unité d'azote par les exploitations soumises à une contrainte de -30% est la suivante :



L'autorisation d'échange de quotas n'est pas très efficace non plus dans ce cas, puisqu'en en moyenne le gain par exploitation avec ce système peut s'améliorer de 247€. L'unité d'azote s'échangerait à 1.53€, soit 0.98€ de plus que sur le marché libre actuel. La quantité de quota échangée par rapport à la quantité totale d'azote échangée seraient de 4.4%, et resterait donc très faible.

### 3.4.3.3 Calculs des niveaux de revenu dans le cas d'une taxe régionale

Une contrainte régionale fixée à -10% de la quantité d'azote autorisée entraîne l'établissement d'une valorisation marginale de l'unité d'azote à 0.41€ pour un prix initial de l'unité à 0.548€. Une réduction de 30% fixe la valorisation marginale à 0.98.

Pour obtenir une diminution des quantités d'engrais azotés, il est possible d'en augmenter le prix. En fixant ce dernier à 0.958€ par unité, la diminution de consommation qui en résulte doit être de 10%.

### Calcul du niveau de taxe nécessaire à une réduction recherchée des quantités d'engrais azotés

	10%	30%
réduction d'azote espérée	10%	30%
Coût initial de l'unité d'azote	0.548	0.548
valorisation marginale de l'unité d'azote	0.41	0.98
coût total de l'unité nécessaire à la réduction	0.958	1.528
taux de taxe à fixer	75%	179%

Il faut donc tripler le prix de l'unité d'azote pour obtenir une réduction de la consommation de 30%. L'impact sur le revenu devient alors beaucoup plus important que dans le cas de restrictions par les quantités.

#### Impact d'une taxe azote sur les revenus des exploitants

	revenu moyen par exploitation (en €)	revenu moyen par ha de SAU (en €/ha)
2006 référence	11848	<b>98</b>
2006 avec taxe de 75%	10650	<b>88</b>
Variation	<b>-10%</b>	<b>-10</b>
2006 avec taxe de 179%	4264	<b>35</b>
Variation	<b>-64%</b>	<b>-63</b>

Pour obtenir une réelle diminution de la consommation d'engrais, il faut un niveau de taxe particulièrement élevé. Ce niveau de taxe entraîne une diminution considérable des revenus agricoles des exploitants.

#### 3.4.3.4 Pénalisations des revenus liées au non respect de la réduction d'intrants imposée

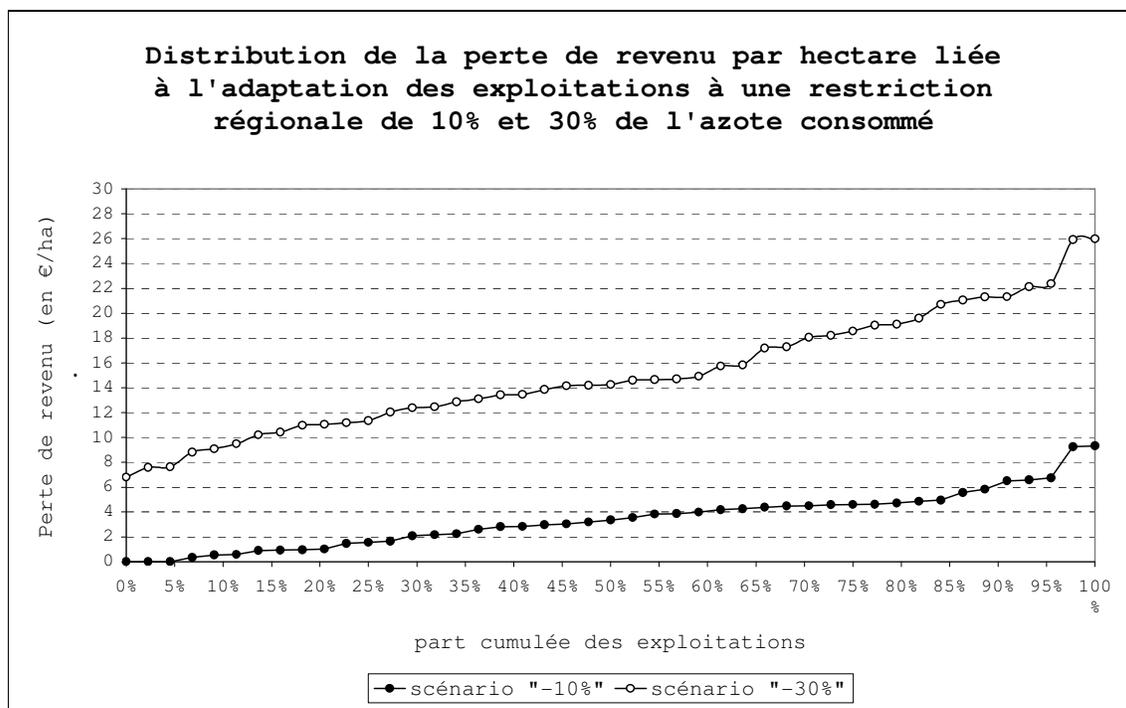
Dans le cas d'une taxe des engrais azotés, les pertes de revenu sont liées à deux phénomènes. Une partie est liée à l'ajustement de l'assolement et des combinaisons d'itinéraires techniques à la nouvelle contrainte de limitation de la quantité d'azote consommée. Cette contrainte ne permet plus d'atteindre le niveau de revenu antérieur.

L'instauration de la taxe entraîne une deuxième source de perte de revenu, puisque toute unité d'azote consommée est payée plus cher.

La chute du revenu moyen par hectare de SAU des exploitations agricoles liées aux modifications de l'assolement et des techniques est de 3€/ha pour une réduction du quota azoté régional de 10% (-10€/ha dans le cas d'une taxe), et de 16€/ha pour une réduction de 30% (-64€/ha dans le cas d'une taxe). L'application de la taxe provoque donc des pertes de

revenu beaucoup plus importantes que celles dues à la modification contrainte des assolements.

Finalement, il est intéressant de regarder la distribution de ces pertes de revenu par exploitation.



Ce graphique montre que plus de 95% des exploitations ont une perte de revenu de moins de 7€ par hectare, si on restreint la quantité régionale d'azote consommable de 10%, et de moins de 22€ par hectare, si on restreint cette quantité de 30%.

Si le choix est laissé à l'agriculteur entre restreindre sa fertilisation de 30% de la dose actuelle ou payer une pénalité de 22€/ha de SAU, il sera économiquement intéressant pour 95% d'entre eux de réduire les quantités de fertilisant azotés utilisées.

### 3.4.4 Bilan des mesures simulées

Les mesures de réductions de -10% et -30% des quantités d'azote consommées autorisées ont été simulées. Les modifications d'assolement qui en résultent sont relativement minimales. La possibilité pour les agriculteurs d'augmenter leurs surfaces en protéagineux pourrait permettre de pallier à la perte de revenu d'une mesure « -10% », et de limiter les pertes d'une mesure « -30% ».

On peut observer des modifications d'itinéraires techniques liées aux réductions des autorisations d'utilisation de l'azote. On voit principalement une extensification des céréales plus particulièrement du blé tendre, et des oléagineux. La betterave et le maïs sont les cultures qui résistent le mieux à l'extensification. Le prix de l'azote ne modifie pas notablement ces résultats.

La mesure « -10% par exploitation » entraîne une réduction du revenu de 4€/ha, soit environ 4% du revenu agricole moyen. La mise en place d'un marché d'échange des quotas réduit cette perte à 3€/ha.

La mesure « -30% par exploitation » réduit le revenu de 18€/ha, soit environ 19% du revenu agricole moyen. Avec un marché d'échange des quotas, la perte est ramenée à 16€/ha.

Un tel marché d'échange risque de s'avérer difficile à mettre en place, et surtout délicat à contrôler. Le gain à en attendre étant relativement faible, il semble qu'une mesure visant à instaurer ce genre de mécanisme ne soit pas la plus judicieuse pour agir sur le niveau de pollution de l'eau par les nitrates.

Pour obtenir une réduction de la consommation d'azote de 10%, une taxe de 75% du prix de l'azote est nécessaire. Elle entraîne une diminution du revenu de 10% en moyenne. On peut douter de l'effet environnemental d'une réduction des quantités d'azote consommées de 10%.

Pour atteindre une réduction de 30%, il faut une taxe de 175% du prix de l'azote.

L'impact sur les revenus serait très important puisqu'il réduirait ceux-ci de 64%.

L'approche d'une diminution de la pollution nitrique par la taxe semble donc délicate à mettre en œuvre et imposerait des transferts importants entre les agriculteurs et les bénéficiaires du montant de la taxe.

Pour limiter l'utilisation d'azote, le système de quotas, non assorti d'un système de marché d'échange semble être la mesure la plus réaliste et la plus facile à mettre en œuvre. Cependant, la limitation par les quantités nécessite un système de contrôle performant à mettre en place, et une allocation des droits à quotas aussi équitable que possible, tenant compte de la diversité régionale et des spécificités des exploitations agricoles.

Il est possible d'éviter de passer par la phase de l'allocation initiale des quotas. En imposant une pénalité équivalente à la perte de revenu par hectare de SAU la plus importante des exploitations (entre 22 et 26€/ha pour une restriction de 30% de l'azote épandu). L'agriculteur a donc le choix entre une réduction volontaire de sa fertilisation et le paiement de la pénalité.

## Conclusion

La mise en place d'une mesure de réduction des apports azotés vise à limiter la pollution des eaux par les nitrates. Réduire les doses épandues entraîne une diminution de la pollution, si les pratiques culturales mises en œuvre continuent à ajuster au mieux les quantités d'engrais aux besoins de la plante durant les phases successives de son cycle de développement. Une diminution individuelle du niveau de fertilisation engendre une baisse de rendement, et par conséquent une diminution du revenu agricole étant donné que les agriculteurs aujourd'hui mettent en œuvre une fumure raisonnée. Agir sur le niveau d'intrants participe donc à contraindre le système de production. L'étude menée montre que l'instauration d'une limitation des apports azotés par une restriction des quantités d'engrais consommés peut être envisagée pour limiter la pollution nitrique. Les conséquences sur la répartition des surfaces des cultures sont peu importantes, et l'effet sur le revenu des agriculteurs (-20% du revenu agricole par hectare en moyenne pour une réduction de la quantité d'engrais azoté de 30%) est beaucoup moins important que dans le cas d'une taxe à l'unité d'azote (-64% du revenu agricole par hectare pour une même réduction de 30% de l'azote consommé).

La réduction envisagée doit tenir compte des spécificités pédoclimatiques de la zone d'application. Les besoins des cultures comme les niveaux de lixiviation des nitrates varient en fonction du sol et du climat régional. La mesure de restriction des nitrates consommés doit donc être régionalisée. Les zones classées « zones vulnérables » dans le cadre de l'application de la directive nitrate pourrait alors être soumise à des restrictions plus sévères pour mieux cibler les effets de la mesure.

Le contrôle du respect des quotas est un point crucial dans l'évaluation de la faisabilité de la mesure. On doit pouvoir vérifier que la quantité maximum d'azote autorisée par exploitation est bien celle épandue sur les cultures. En ce qui concerne l'azote chimique, les quantités achetées par les exploitants peuvent être contrôlées sur factures d'achat. Les échanges entre les exploitations spécialisées en élevage et celles spécialisées en grandes cultures doivent pouvoir être contrôlés eux aussi, car les exploitations d'élevage doivent justifier par des plans d'épandages, l'utilisation ou de devenir des lisiers. Le problème le plus important se situe dans les exploitations de polyculture élevage, car il est difficile de contrôler les transferts internes entre systèmes de culture et système d'élevage. On pourrait alors dans ce cas imaginer un système de modulation du quota d'azote en fonction du nombre et de la nature des animaux déclarés sur l'exploitation. Les plans de fertilisation obligatoires dans le cadre de l'écoconditionnalité des aides permettent de vérifier la nature et les quantités des fertilisants utilisés sur les cultures

L'étude menée montre que la mise en place d'un marché des quotas ne semble pas se justifier, les volumes échangés restant très faibles (4.4% du volume total d'azote consommé) pour des scénarii de réduction allant jusqu'à 30%. Les coûts liés à la création, à la gestion et au contrôle d'un tel marché d'échange pourraient être assez élevés étant donné la complexité du système à mettre en place.

Un quota d'azote par exploitation permet de limiter la quantité totale utilisée. Certaines parcelles de l'exploitation sont plus susceptibles que d'autres de générer une pollution des eaux par les nitrates. Gérer une limitation de l'utilisation d'engrais à l'exploitation ne garantit pas que les parcelles qui seront extensifiées seront celles situées dans les zones les plus sensibles à la pollution nitrique.

La fixation des quotas peut entraîner une rigidification des assolements, en augmentant la difficulté d'introduire de nouvelles cultures dans les systèmes. Il est important de prendre en compte cette nouvelle contrainte délimitation de la fertilisation dans l'évolution des systèmes.

L'étude réalisée s'est appuyée sur le modèle MAORIE pour effectuer les simulations nécessaires à l'évaluation des impacts de la mesure. L'intégration de critères environnementaux dans le modèle est conditionnée par une connaissance très fine des mécanismes reliant la prise de décision, les pratiques, et les effets environnementaux dans une exploitation. Un retour à une modélisation d'exploitation type pourrait s'avérer nécessaire pour pouvoir encore mieux appréhender les problèmes environnementaux au niveau d'une modélisation régionale par MAORIE.

Ce travail fait ressortir l'importance des données et la limitation qu'elles imposent à l'exercice de simulation. Un enrichissement des bases de données actuelles par des variables à caractère environnemental serait souhaitable pour pouvoir continuer et affiner les résultats obtenus dans le cadre de cette approche.

La nécessité d'une mesure de réglementation de l'utilisation des engrais azotés en agriculture dépend de l'évolution de la consommation d'azote. Une analyse approfondie des variations des volumes d'engrais utilisés ces dernières années serait nécessaire pour mieux comprendre les facteurs qui conditionnent cette consommation, ainsi que pour connaître la tendance de l'évolution des quantités consommées.

La relation entre les quantités d'azote consommé et les effets environnementaux liés à leur lixiviation pourrait permettre de comparer la pertinence de la mesure de réduction des engrais azotés à d'autres mesures possibles de lutte contre la pollution par les nitrates comme l'introduction de cultures intermédiaires. Le couplage entre un modèle agro climatique comme CERES et un modèle économique comme MAORIE pourrait permettre de tester l'impact de ces différentes mesures, et d'étudier une éventuelle complémentarité entre elles.

# Bibliographie

## Article

- Armand-Madelin V., 1992, La prise en compte de l'environnement dans les politiques agricoles, *Economie et statistique*, 258-259, p 105-112. ....60
- Baumol W.J., 1972, On taxation and the control of externalities, *American Economic Review*, n°62, p307-329. ....22
- Bel F., Lacroix A., Mollard A. et Regazraz E., 1999, Réduire la pollution azotée, les choix préalables d'une politique publique ; *Courrier de l'environnement de l'INRA* n°36, mars. ....19, 21
- Bonny S., 1994, Vers une agriculture plus respectueuse de l'environnement?, *Cahiers Agriculture*, n°3, p385-396..... 9
- Bontems P., Turpin N. et Rotillon G., Restauration de la qualité des eaux de surface: comparaison de mécanismes incitatifs, 2003, *Working papers from THEMA*, n° 2003-12. ....10
- Catroux G., Germon J.C. et Graffin Ph., 1974, L'utilisation du sol comme système épurateur, *Annales Agronomiques*, n°25, p179-193. .... 9
- CTGREF, 1974, Procédés de traitement et d'utilisation des lisiers de porcs comme fertilisants, *Informations Techniques du CTGREF, Procédés de traitement et d'utilisation des lisiers de porcs comme fertilisants, Informations techniques du CTGREF, cahier n°14*, p4..... 9
- Dales J.H., 1968, Land, Water, and Ownership, *Canadian Journal of Economics*, n°4, p791-804.....20
- Dinard A., et Howitt R., 1997, Mechanisms for allocation of environmental control cost: empirical tests of acceptability and stability. *Journal of environmental Economics and Management*, n°49, p183-203. ....14
- England, 1986, Reducing the nitrogen input on arable farms, *Journal of Agricultural Economics*, n°37, p13-23, 23, 60
- Kampas A., et White B., 2003, Selecting permit allocation rules for agricultural pollution control: a bargaining solution ; *Ecological Economics*, n°47, p135-147.....14
- Kverndokk S., 1995, Tradeable CO2 emissions permits: initial distribution as a justice problem. *Environmental Values*, n° 4, p129-175. ....14
- Lacroix A., 1995, Des solutions agronomiques à la pollution azotée, *Cahiers de l'agriculture*, n°4, p333-342. ....19
- Le Roch C., Mollard A. 1996, Les instruments économiques de réduction de la pollution diffuse en agriculture, *Cahiers d'économie et sociologie rurales*, p39-40, p63-92. ....23, 60
- Magazine 50 millions de consommateurs, 1989, Les champions de la pollution verte..... 9
- Mahé L.P. et Rainelli P., 1987, Impact des pratiques et des politiques agricoles sur l'environnement; *Les cahiers d'Economie et de Sociologie Rurales*, n°4, avril. ....11
- Mary B, 1992, Gérer l'interculture pour maîtriser la pollution nitrique; *Journée d'étude Interculture et nitrates, CORPEN-COMIFER*, janvier, 16p .....21
- Normand B., 1996, Etude expérimentale et modélisation du devenir de l'azote dans le système sol-plante-atmosphère ; *Thèse de géophysique-géochimie-géomécanique, Université Joseph Fourier, Grenoble*, 190p. ....21

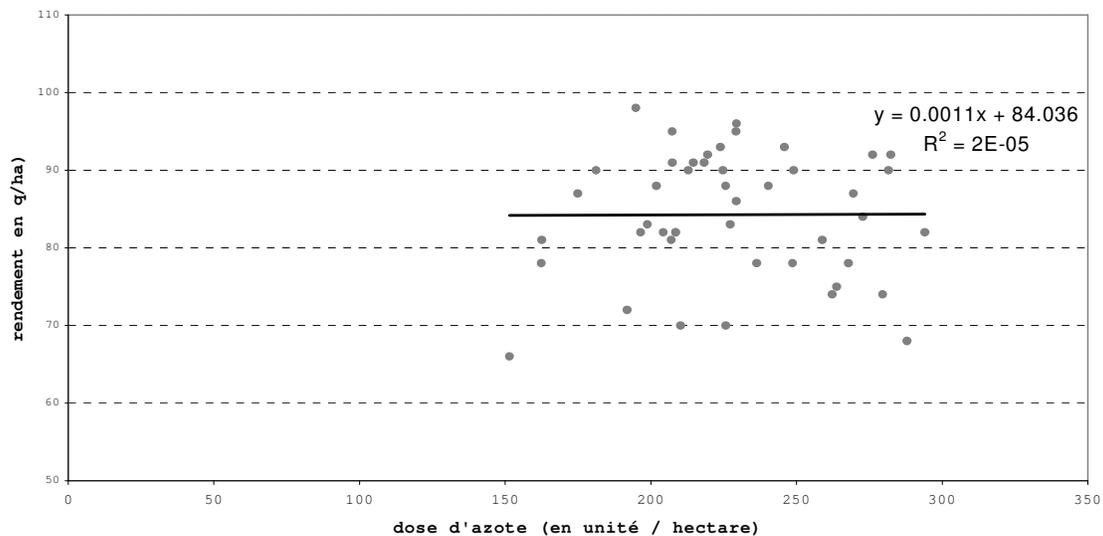
Oger R., 1994, Le choix et l'interprétation des fonctions de réponse à la fumure azotée des céréales; Billet de Recherche Agronomique, Gembloux, n°29, p289-313.....	32
Que choisir, 1990, La pollution cachée, n° 257, p37-44. Pesticides: l'ennemi numéro2, n°260, p10-12. ....	9
Règlement du conseil (CEE), n° 2078/92, ou règlement agroenvironnemental.....	17
Rude S., Dubgaard A., 1989, Policy Instruments to controle the use of Nitrogen ; Report to the national Agency of Environmental Protection, Copenhagen : Institute of Agricultural Economics. ....	23, 60
Stavins R., 1997, What can we learn from the grand policy experiment? positive and normative lessons of the SO2 allowance trading ; Journal of Economic Perspectives, n° 12, p69-88.....	14, 25
Weitzman M.L., 1974, Prices versus Quantities, Review of Economic Studies, n°41; p 477-491. ....	12
Wu J.J. et Bablock B.A., 1996, Contract design for purchase of environmental goods from agriculture, American Journal of Agriculture Economics, n° 78, p935-945. ....	10
<b>Lois</b>	
Directive 80/778/CEE du conseil, du 15 juillet 1980, relative à la qualité des eaux destinées à la consommation humaine, Journal officiel n° L229 du 29/10/1979 p0011. ....	7
Directive 91/676/CEE du conseil, du 12 décembre 1991, concernant la protection des eaux contre la pollution par les nitrates à partir de sources agricoles, Journal officiel n° L375 du 31/12/1991 p 0001-0008.....	13
<b>Livre</b>	
Addiscott T.M., Whitemore A.P., Powlson D.S, 1991, Farming, Fertilizers and Nitrate Problems, CAB International, Leaper and Gare Ltd, Bristol, 170p.....	19
Baumol W.J. et Oates W.E., 1988, The theory of environmental policy, Cambridge Univesity Press, Cambridge. ....	10
Carson R, 1962 - Silent spring. Boston, Houghton Mifflin (traduit en français: Le printemps silencieux, Paris, Plon, 1964). ....	7
Kolstad C.D., 2000, Environmental Economics, Oxford University Press, New York, 400p. ....	10
Teissier D., 2004, Index des prix et des normes agricoles, 20e édition, Paris, 196p.....	46
<b>Rapports</b>	
Agreste Conjoncture, 2000-2005, Le Bulletin, Les séries mensuelles de l'agriculture et des industries agroalimentaires, Ministère de l'agriculture et de la pêche.....	45
Bonny S., 1993, Le changement technique en cours et à venir en agriculture: un essaide bilan dans les différents secteurs, INRA ESR, Grignon.....	20
Bontems et Rotillon, 1998, Economie de l'environnement, Paris, Repère n°252, 118p.....	7
Bureau D. et Bureau J.C., 1999, Agriculture et négociations commerciales, Rapport du Conseil d'Analyse Economique, p67.....	21
Carles et Millet, 1995, L'adaptation des exploitations de grande culture à la nouvelle politique agricole commune, Economie et Sociologie Rurale, n°19. ....	21

Cerf M. et Meynard J.M., 1989, Sur l'origine du hiatus entre les conseils techniques et la pratique des agriculteurs, résultats d'une enquête sur la fertilisation; Communication au 11e congrès de Génie Rural, Dublin, 4-8 septembre .....	17
Chambre d'agriculture, 1992, Rapport sur la pollution des eaux par les nitrates; n°797. ....	9
DGEMP-DIREM, Les statistiques sur le pétrole et les produits pétroliers, site du Ministère de l'industrie, octobre 2005.....	47
Direction générale de l'énergie et des matières premières, Observatoire de l'énergie, 2004, Synthèse des travaux réalisés en 2004. ....	47
European Environment Agency, 2002, Environmental signals 2002 : Benchmarking the millennium, European Environment Agency, Copenhagen, 145p.....	7
FIRS, 2002, Rapport annuel, Fond d'intervention et de régularisation du marché du sucre. ....	51
Hénin S, 1980 - Activités agricoles et qualité des eaux, Paris, Ministère de l'Agriculture et ministère de l'Environnement .....	7
Ministère de l'agriculture, de l'alimentation, de la pêche et des affaires rurales, La nouvelle Politique Agricole Commune: Conditionnalité 2005 Livret I et II, décembre 2005.....	16
Mollard A., Vachaud G., 1998, Agriculture durable, protection du sol et des ressources en eaux souterraines: une approche interdisciplinaire ; Rapport final, Programme Environnement du XIe Contrat de Plan Etat-Région Rhône-Alpes, LTHE/CNRS/R&A, janvier, 102p + ann.....	17, 19
Noirfalise A, 1974 - Conséquences écologiques de l'application des techniques modernes de production en agriculture, Informations internes sur l'agriculture, Bruxelles, Commission des Communautés Européennes, n°137, novembre .....	7
Notes et études économiques, L'évaluation de la politique de soutien à l'agroenvironnement, 2005, 160p. ....	15
OCDE, 2001, Domestic Transferable Permits for Environmental Management: Design and Implementation, OECD, Paris, 113p.....	11
Préault B., 2004, Impacts économiques de différentes mesures agri-environnementales sur le revenu des agriculteurs, Rapport DEA, INRA. ....	34
Rapport d'évaluation sur la gestion et le bilan du programme de maîtrise des pollutions d'origine agricole, Tome 1 : Rapport de synthèse, n°99-M-018-01 et n°99-RI-TERM-023-R ; ministère de l'économie des finances et de l'industrie – ministère de l'aménagement du territoire et de l'environnement – ministère de l'agriculture et de la pêche, juillet 1999, 52p, pp 48-51.....	18
RICA, 1993-2001, base de données du réseau d'information comptable agricole, INSEE-INRA-SCEES.....	51
Sondes SCEES, 2000-2003, Base de données des sondes de grande cultures d'Ile de France, INSEE-INRA-SCEES .....	51
Sourie J.C, Millet.G, Guindé.L, 2004, Analyse micro-économique de scénarios de réforme de l'OCM sucre à l'aide d'un modèle d'offre agricole; Adeprina & Ministère de l'agriculture.....	54

## **Annexes**

## Annexe 1 : Recherche d'une corrélation entre la dose d'azote/ha et le rendement sur l'ensemble des exploitations de l'échantillon.

Essai d'ajustement linéaire de la relation entre dose d'azote/ha et rendement en blé tendre des exploitations de l'échantillon

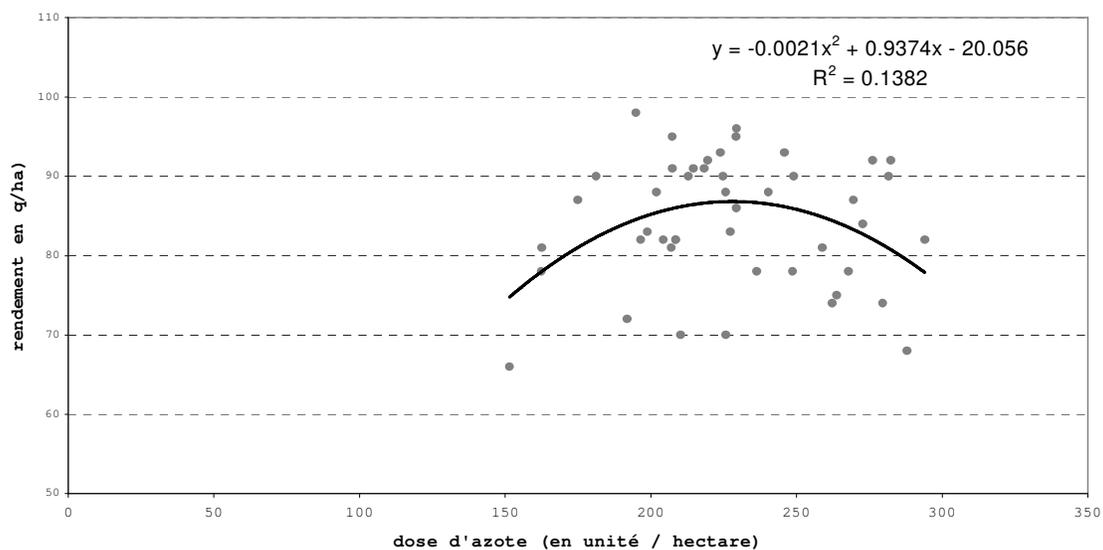


La régression linéaire de la variable  $Y$  « rendement en blé » sur la variable  $X$  « dose/ha » donne un coefficient de corrélation  $R^2$  très faible de  $2E-05$ .

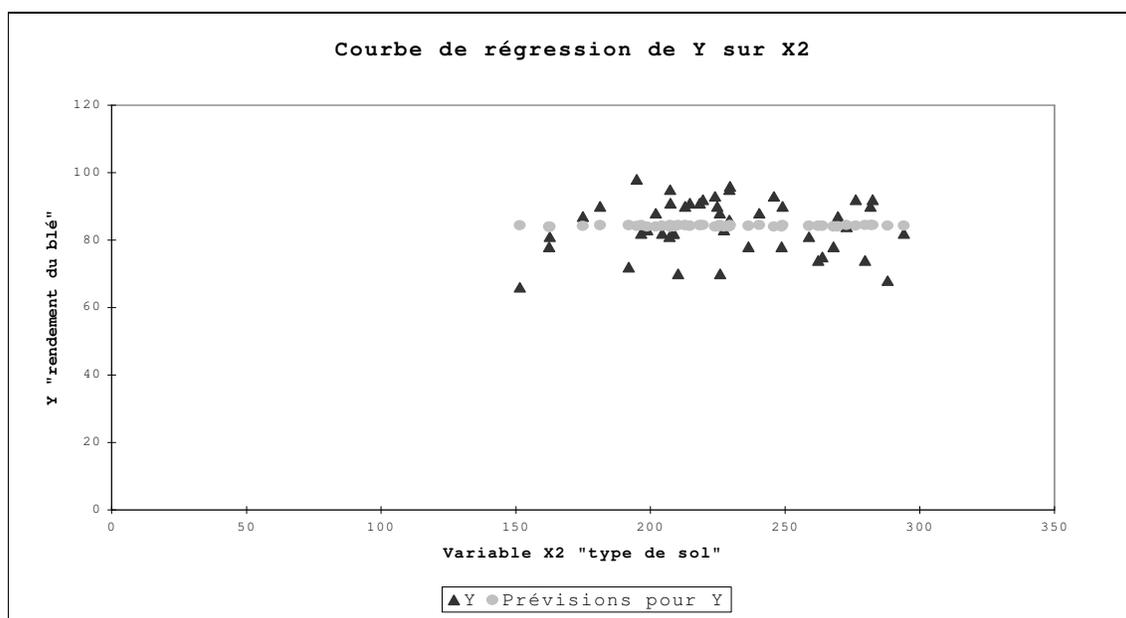
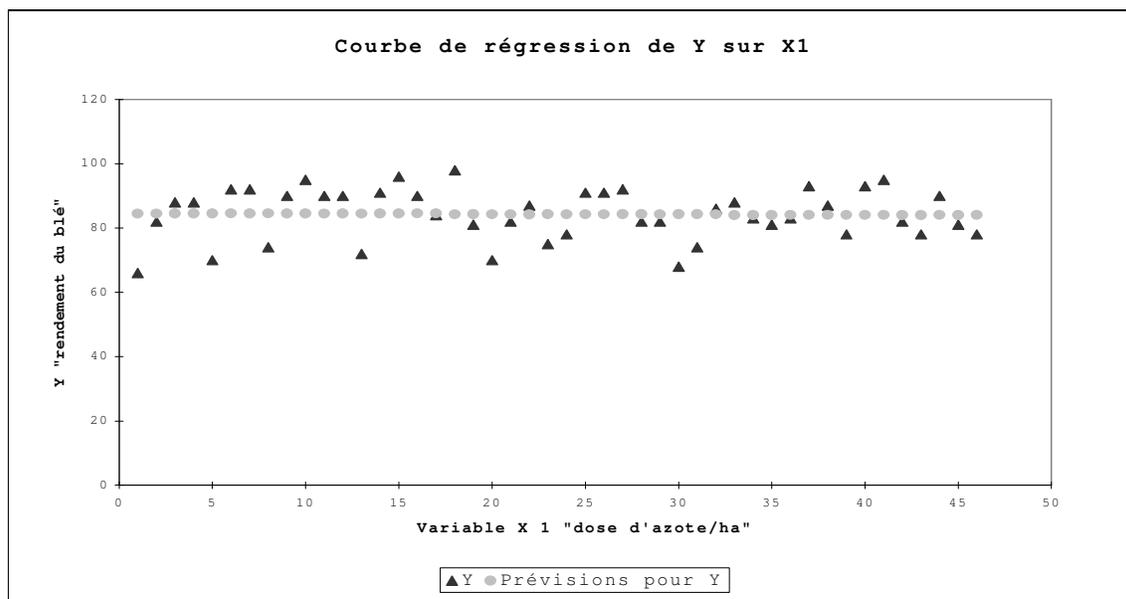
Le modèle économétrique est le suivant :  $Y = 0.0011X + 84.0359$

Le test du F de Fisher est utilisé. La probabilité associée au F est dans ce cas supérieure à 0.974, cela signifie que l'on prend un risque de se tromper de plus de 97.4%. La variable explicative n'apporte donc pas d'information significative au modèle.

Essai d'ajustement polynomiale de la relation entre dose d'azote/ha et rendement en blé tendre des exploitations de l'échantillon



## Annexe 2 : Recherche de l'influence de la variable pédologique sur la relation azote – rendement.



La régression linéaire de la variable  $Y$  « rendement en blé » sur les variables  $X_1$  « dose/ha » et  $X_2$  « type de sol » donne un coefficient de corrélation très faible de  $6E-04$ .

Le modèle économétrique est le suivant :  $Y = -0.2301X_1 + 0.0007X_2 + 84.5631$

La probabilité associée au test du F de Fisher F est dans ce cas supérieure à 0.987, cela signifie que l'on prend un risque de se tromper de plus de 98.7%. Il n'y a donc pas de corrélation entre les deux variables. La relation n'est pas significative.

Les résultats issus du modèle linéaire sont suffisants pour ne pas poursuivre les recherches sur un autre ajustement, et pour considérer que la relation entre dose d'azote/ha et rendement ne peut être mise en valeur par la méthode économétrique sur cet échantillon.

### **Annexe 3 : Le modèle « Estiquotas » d'estimation des quotas betteraviers des exploitations agricoles du RICA.**

Une partie de la production est régie par un système de quotas par exploitation, rémunérés à un prix fixé. On l'appelle la « betterave quotas ». Elle comprend le quota A au prix le plus élevé, et le quota B à un prix un peu inférieur, et égal à 30% du quota A en quantité.

Le reste de la production est considéré comme la « betterave hors quotas ». On y regroupe les quantités de betterave produites pour assurer la production du quota, celles produites pour la vente sur le marché mondial, enfin la production de betterave éthanol et alcool. Ces deux dernières sont limitées par un système de contrats passés avec les usines de transformation.

La modélisation des quotas betteraviers doit être assez précise. Or les données utilisées ne distinguent pas les différents types de betterave et notamment les betteraves du quota.

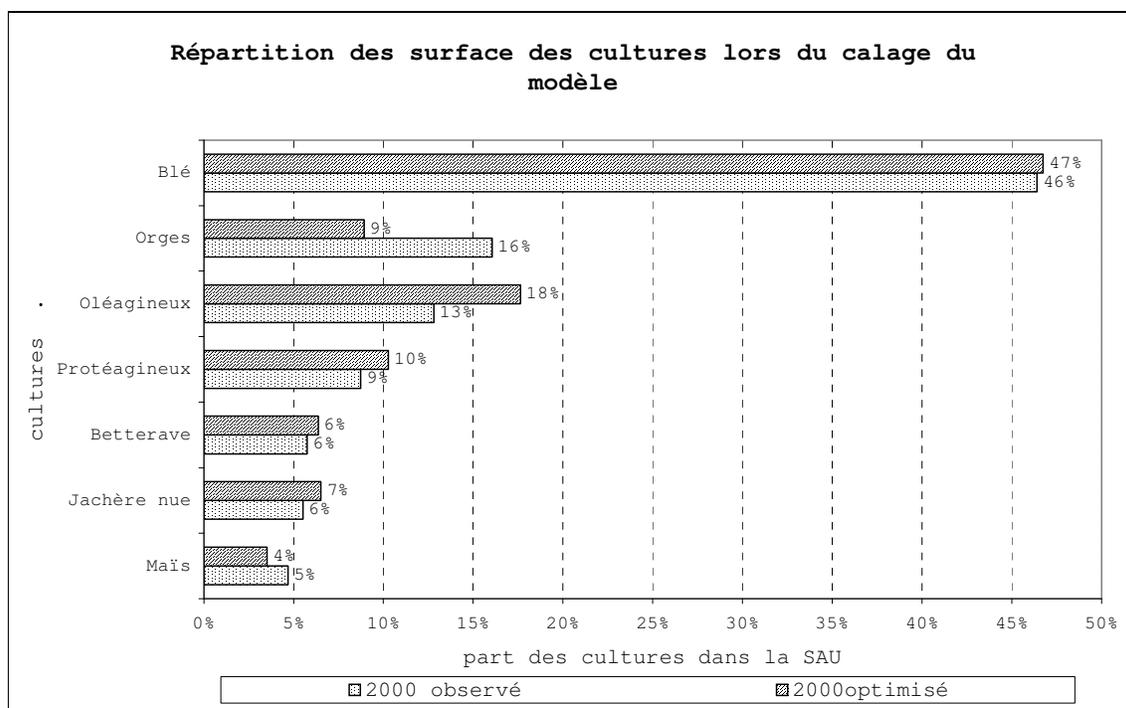
Les données disponibles dans le RICA sont le produit brut par culture, la surface et le rendement, toutes betteraves confondues. Le prix de la tonne de quota est connu. Il est égal à la moyenne pondérée des prix de la betterave A et B qui sont fixés administrativement. Le prix de la betterave hors quota n'est pas constant. Il est cependant limité à l'intervalle 8€/t-20€/t, déterminé par observation des données historiques des dix dernières années.

Pour obtenir une estimation de la betterave du quota et de la betterave hors quota, on va minimiser l'écart entre le produit calculé et le produit observé, sous les contraintes suivantes :

- La quantité de betterave hors quota doit être comprise entre 10% et 25% du quota. (intervalle déterminé à partir d'observations, et à dire d'expert).
- La quantité moyenne de betterave hors quota au niveau régional doit être égale à 15% de la quantité totale de betterave produite (données statistiques nationales)

Le ratio quota B / quota A étant fixé dans chaque exploitation, on en déduit la part de quota A et de quota B. Les productions de betterave éthanol et alcool sont obtenues par tirage aléatoire tout en respectant le nombre et à la surface moyenne de ces contrats au niveau régional. On peut finalement vérifier que la répartition des surfaces en betterave dans chacune des catégories au niveau régional correspond aux données disponibles dans les statistiques nationales.

**Annexe 4 : Graphique servant au calage du modèle, en comparant les surfaces observées aux surfaces optimisées pour l'année 2000.**



**Annexe 5 : Composition de la part du revenu liée aux produits divers dans le revenu agricole moyen de l'année 2000 des exploitations des régions betteravières.**

	revenu (en €/ha)
<b>Produits divers</b>	<b>86</b>
<i>dont</i>	
Indemnités d'assurances	35
Activités annexes	15
Production d'immobilisations	8
Remises ristournes	5
Produits financiers	5
Produits divers de gestion	5
Travaux pour tiers	4
Terres louées prêtes à semer	3