

Lutte contre la pollution
diffuse sur un bassin d'élevage :
comparaison d'instruments
de régulation en présence
d'asymétrie d'information

*Nadine TURPIN
Philippe BONTEMS
Gilles ROTILLON*

Reducing non-point source pollution from dairy farming: a comparison of policy instruments when information asymmetry matters

Key-words:

non linear taxation, asymmetric information, non point source pollution, water quality

Lutte contre la pollution diffuse sur un bassin d'élevage : comparaison d'instruments de régulation en présence d'asymétrie d'information

Mots-clés:

taxation non linéaire, information asymétrique, pollutions diffuses, pollution des eaux

Summary – A regulator who wishes to mitigate non-point source pollution and maintain the farmers' revenue can choose among several policy tools. This paper compares the expected effects of several instruments on the pollution and profit levels, taking into account their acceptability: linear taxation of fertilisers, uniform extensification, fertiliser quota. We focus on the interest of designing regulation mechanisms based on a non-linear taxation of the production. The empirical results concern a watershed in the western part of France.

Résumé – Plusieurs mécanismes économiques sont à la disposition d'un régulateur souhaitant limiter les pollutions diffuses tout en préservant l'activité agricole. Cet article compare l'effet attendu sur la pollution et le revenu, au sein d'une population d'éleveurs laitiers, de plusieurs instruments en tenant compte de leur acceptabilité: taxation linéaire sur les engrais, extensification uniforme, quota d'engrais. Il illustre également l'intérêt de construire des mécanismes de régulation reposant sur une taxation non linéaire de la production. Les résultats du modèle présenté ici reposent sur des données acquises sur un bassin versant d'élevage en Loire-Atlantique.

* Cemagref, UR GERE, 17 avenue de Cucillé, CS 64427, 35044 Rennes Cedex
e-mail: nadine.turpin@cemagref.fr

** INRA, IDEI, Université de Toulouse 1, Pôle Manufacture, 21 allée de Brienne, 31000 Toulouse
e-mail: bontems@toulouse-inra.fr

*** THEMA, Université de Paris X, 200 avenue de la République, 92001 Nanterre Cedex
e-mail: rotillon@u-paris10.fr

Les travaux dont quelques résultats sont présentés ici ont été rendus possibles par l'appui financier du Cemagref (Thème mobilisateur: Economie des équipements), de l'Union européenne sur le bassin du Don dans le cadre du projet AgriBMPWater (<http://www.bordeaux.cemagref.fr/adbx/agribmpwater/index.html>), du Conseil régional et de l'Union européenne sur le sous-bassin du Cétrais (Turpin *et al.*, 2001).

Les auteurs remercient les deux rapporteurs pour leurs commentaires constructifs, ainsi qu'André Le Bozec, Pascal Mallard, Nicolas Petit, Etienne Pierron, François Roche qui ont bien voulu relire et commenter une première version de ce papier. Les erreurs qui resteraient dans le texte relèvent de la seule responsabilité des auteurs et n'impliquent en aucun cas leurs organismes respectifs.

LES problèmes environnementaux suscités par les pollutions des eaux d'origine agricole font l'objet de fréquents débats quant aux politiques à mettre en œuvre. Ces pollutions présentent un caractère diffus car les actions individuelles des agriculteurs sont difficilement observables. De plus, il existe souvent une forte hétérogénéité des producteurs, qui provient à la fois de leurs moyens de production (qualité des sols, situation climatique, capacités de gestion, qualité génétique du troupeau) et d'objectifs personnels qui peuvent être très différents. Cette hétérogénéité se traduit en particulier par une variété de choix techniques comme l'intensification de la production, les quantités d'inputs utilisés, les techniques culturales et d'élevage. Elle a aussi des conséquences sur les décisions des producteurs face à une régulation, ainsi que sur les quantités de polluants qu'ils émettent, un choix technique identique dans deux exploitations distinctes pouvant se traduire par des émissions différentes. Elle renforce enfin l'asymétrie d'information entre les agriculteurs et le régulateur qui ne peut observer toutes leurs actions sans coût, et complique l'élaboration des régulations environnementales.

Dans le cas de pollutions diffuses des eaux par les activités d'élevage qui nous intéresse ici, Bontems *et al.* (2003) proposent un mécanisme de régulation d'une population hétérogène de producteurs laitiers, différencié de façon optimale sur le niveau de production de lait. Il s'agit d'une régulation indirecte, les mécanismes de régulation usuels (taxes individuelles sur émissions, normes sur émissions individuelles) étant difficilement applicables en raison du caractère diffus des pollutions (Shortle et Horan, 2001). De nombreux auteurs se sont intéressés à l'élaboration de régulations indirectes, basées sur des variables corrélées avec les émissions individuelles des agriculteurs (Wu et Babcock, 1996), mais les tentatives d'application de la théorie de l'Agence aux pollutions diffuses restent rares. La régulation indirecte est aussi souvent l'option retenue par les régulateurs (Flory, 2003).

Compte tenu des conditions de production agricoles très hétérogènes, il serait souhaitable de tenir compte des caractéristiques individuelles lors de l'établissement de la régulation optimale. Dans la pratique, un régulateur (un responsable de la politique de l'eau, un « décideur public », une agence environnementale) ne dispose pas de toute l'information nécessaire pour mettre en place ces instruments, ne connaissant ni les émissions individuelles, ni les coûts de dépollution des agents. En vertu du **principe de révélation**, la régulation différenciée optimale doit alors satisfaire des contraintes d'auto-sélection, en plus des contraintes de participation. De manière alternative, le régulateur peut disposer d'informations sur les caractéristiques individuelles en nombre suffisant, mais, pour des raisons institutionnelles, être dans l'impossibilité d'imposer une réglementation différenciée *a priori* (discrimination du premier rang). C'est le cas lorsque le principe d'égalité devant l'impôt est invoqué : en vertu de ce principe, tout individu doit en effet se voir offrir les mêmes

possibilités de contrats qu'un autre individu. En d'autres termes, le régulateur peut proposer aux individus d'effectuer un choix au sein d'un menu de contrats, ce menu étant commun à tous. Le menu de contrats optimal satisfait les contraintes d'incitation évoquées précédemment et induit une auto-sélection des agents en fonction de leurs caractéristiques.

L'objectif de cet article est de comparer les performances relatives, du point de vue du bien-être social, de la taxation non linéaire de la production caractérisée dans Bontems *et al.* (2003) avec d'autres instruments de régulation simples (quota de production, quota d'input – engrais, taxe sur l'input), mais non discriminants, c'est-à-dire ne tenant pas compte des caractéristiques individuelles des éleveurs. Tous les instruments comparés le sont sur la base de leur niveau optimal, c'est-à-dire du niveau maximisant le bien-être social. Cette comparaison est menée sur la base d'une application empirique à un bassin versant en Loire-Atlantique.

Par ailleurs, nous intégrons dans l'analyse deux scénarii concernant la capacité de réforme du régulateur. Dans le premier scénario, le régulateur doit simplement assurer un revenu minimal uniforme et exogène à tous les agriculteurs. Dans ce cas, le pouvoir de marchandage du régulateur est relativement fort dans la mesure où la réforme peut être réalisée sans tenir compte des revenus agricoles précédant le changement de politique. Par opposition, le second scénario décrit la situation où le régulateur est contraint de tenir compte de l'acceptabilité de la réforme et donc de la perte éventuelle de revenus agricoles avec la mise en place de la politique environnementale. Plus précisément, nous déterminons la régulation optimale qui permet à un pourcentage exogène d'agriculteurs de réaliser, après régulation, un profit égal ou supérieur à celui qu'ils obtenaient avant, les types d'agriculteurs « gagnants » étant déterminés de manière endogène avec la caractérisation de la politique optimale.

Nous mettons ainsi en évidence que l'accroissement le plus important du bénéfice net du régulateur est obtenu par le mécanisme non linéaire basé sur le niveau de production. Toutefois cet accroissement s'amenuise naturellement avec la proportion d'agriculteurs non lésés financièrement par la régulation. Enfin, nous indiquons plusieurs politiques permettant de respecter la valeur guide européenne de 25 mg de nitrates par litre d'eau (en année moyenne). Parmi celles-ci, la taxation non linéaire de la production est la seule qui conduit à un bénéfice social positif.

Le cadre d'analyse empirique est présenté dans la première partie. Nous décrivons tout d'abord le contexte environnemental et institutionnel, puis nous caractérisons les technologies de production et le dommage environnemental associé. Dans la deuxième partie, nous examinons comment le régulateur peut construire un mécanisme incitant de façon efficace les éleveurs à moins polluer dans un contexte d'asymétrie d'information. Nous comparons ensuite ce mécanisme avec des démarches plus traditionnelles comme des taxes sur les engrais, la limitation de la production, un quota d'engrais. Les principaux résultats obtenus sont résumés en conclusion.

CARACTÉRISATION

Contexte environnemental et institutionnel

Les travaux qui sont décrits ici ont été réalisés dans le cadre du projet de recherche européen AgriBMPWater, dont l'objectif est de fournir une grille coût-efficacité de modifications des pratiques agricoles sur huit bassins européens. Le bassin qui nous a servi de support est le bassin du Don, un affluent de la Vilaine. Le Don se jette dans la Vilaine un peu en amont d'une station de captage d'eau destinée à être rendue potable. Le bassin, situé sur schistes, a une superficie totale de 705 km², dont 55 000 hectares de surface agricole utile. Le bassin versant du Don présente une eau de qualité dégradée sur le paramètre azote (les concentrations en nitrates, mesurées par la DIREN, dépassent 50 mg/l en fin d'hiver en 1995-96, 1996-97 et 1997-98) et plutôt bonne sur le paramètre phosphore. La contamination azotée des eaux est en relation avec l'activité agricole, puisque le bassin possède peu d'activités industrielles et une densité de population faible (moins de 40 habitants au km²). Sur ce bassin, les agriculteurs produisent essentiellement du lait (70 % des exploitations possèdent un atelier lait), de la viande bovine et des céréales. Les diagnostics de risque de pollution réalisés sur le bassin mettent l'accent sur l'absence de relation statistique entre le système de production agricole et la pollution générée. En revanche, certaines pratiques comme les apports de fumiers sur prairies âgées avant retournement, ou la fertilisation excessive des cultures fourragères, sont mises en avant comme facteurs de risque. Ces pratiques sont particulièrement fréquentes dans les ateliers laitiers.

Nous avons restreint notre analyse à la production laitière. Cela ne signifie pas que nous avons considéré que les autres productions polluaient moins : des démarches similaires peuvent leur être appliquées, dont l'exposé alourdirait inutilement ce papier. En revanche, nous négligerons délibérément ici les interactions, au sein d'une exploitation, entre les différentes productions possibles (substitution possible entre une activité d'élevage bovin viande et la production de céréales par exemple). Cette restriction nous conduit à surestimer la variation de surplus des agriculteurs consécutive à la mise en place des instruments de régulation environnementale, en négligeant les substitutions et les complémentarités entre les différents outputs.

Les exploitations laitières du bassin versant du Don sont soumises à la réglementation nationale (Installations classées pour la protection de l'environnement) et au programme d'action de la Directive Nitrates, élaboré par le département et actualisé tous les quatre ans. Le programme en vigueur en 2003 comporte des pratiques culturelles obligatoires (le bassin du Don est situé en zone vulnérable au sens de la Directive Nitrates), mais dont l'application et les effets sont difficiles à vérifier : fertilisation raisonnée, interdiction d'apports de fumiers sur retourne-

ments de prairies de plus de six ans, interdiction d'utilisation d'engrais organiques près des ruisseaux et fossés, etc.

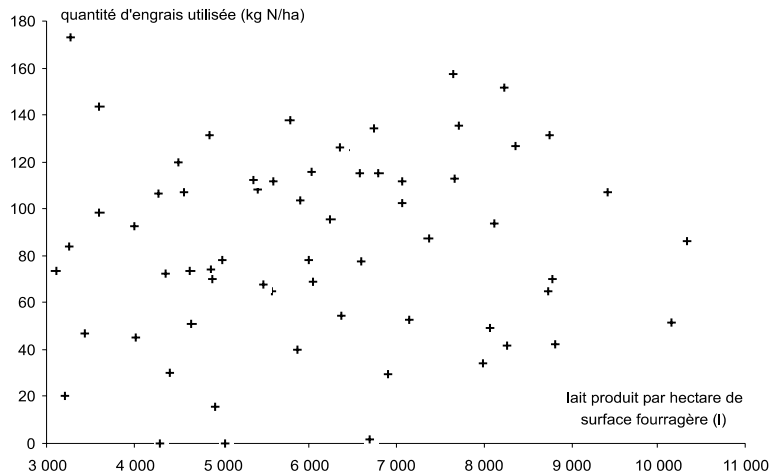
Technologies de production des éleveurs

En pratique, l'observation de plusieurs variables comme base de la régulation est coûteuse et certaines variables sont plus difficiles à observer que d'autres. Dans le cas de pollutions par des activités d'élevage qui nous intéresse ici, les engrais réellement utilisés sont plus difficiles à observer que la production. Ainsi, si on appliquait une taxe différenciée sur les engrais consommés, la probabilité d'inciter à un marché parallèle serait plus importante qu'avec une taxe basée sur la production. Il nous semble donc raisonnable de retenir le niveau de production comme base de la régulation.

Un éleveur donné produit une quantité y de lait par hectare, sur une surface potentielle S et utilise pour cela une quantité x d'engrais et une surface effective s . Les variables y , s et S sont facilement observables à un coût négligeable. Au contraire, la quantité d'engrais utilisée par hectare ne peut être connue que par enquête.

De plus, la population d'éleveurs est hétérogène : chacun dispose de sols, de situation climatique, de compétences techniques et de gestion, d'habileté d'éleveur très différents. Cette hétérogénéité se traduit, entre autre, par une grande dispersion de la production de lait par hectare de surface fourragère, elle peut expliquer la grande dispersion observée de la quantité d'engrais minéraux apportée sur cette surface fourragère (voir graphique 1).

Graphique 1.
Production laitière
par hectare de surface
fourragère affectée au
troupeau laitier et
fertilisation azotée
minérale observée sur
un échantillon
d'exploitations du
bassin du Don

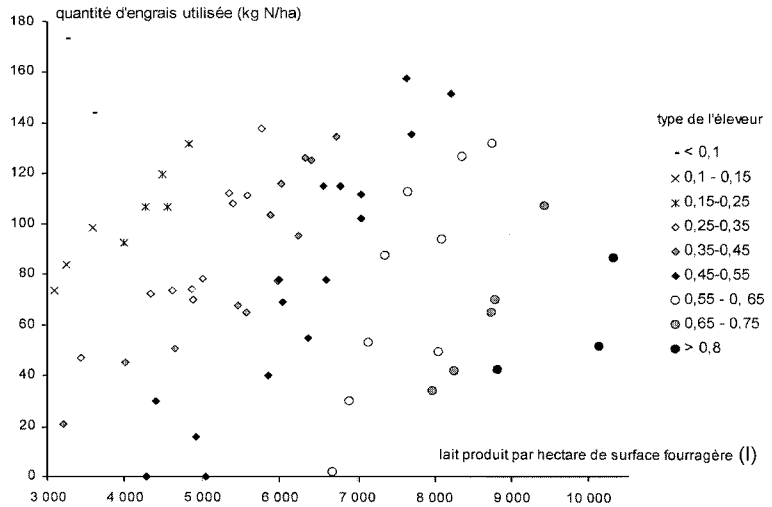


Les éleveurs ont une connaissance empirique de ces éléments et l'utilisent pour prendre leurs décisions de production. C'est la com-

binaison concrète de ces divers paramètres qui explique la performance individuelle des producteurs. Nous nous proposons de construire un indicateur synthétique de ces combinaisons, θ , défini comme étant le type de l'éleveur et reflétant la capacité de l'éleveur à valoriser sa surface fourragère pour produire du lait.

De ce fait, la quantité d'engrais minéraux utilisée par un éleveur découle de son type et du niveau de production qu'il choisit : plus l'éleveur est habile (plus son type θ est élevé), moins il a besoin d'engrais minéral¹ et plus il produit de lait par hectare (voir graphique 2).

Graphique 2.
Production laitière et utilisation d'engrais minéraux selon le type de l'éleveur, θ



En pratique, sur le Don, pour estimer ce paramètre, la population de 868 exploitations a été stratifiée en fonction des systèmes de production (système lait, système lait associé à un atelier hors sol, production de viande bovine naisseur, etc.), puis un échantillon a été tiré de façon aléatoire avec un effectif proportionnel à la taille de la strate (10 % de chaque strate). Une enquête, menée par les conseillers de la chambre d'agriculture et le *Cemagref*, a porté sur les productions, les pratiques de fertilisation actuelles, leur évolution depuis cinq ans et leur évolution prévue, la manière dont l'éleveur envisage l'environnement et ses projets de développement. Nous avons supposé que les réponses des éleveurs à cette enquête étaient « honnêtes » (c'est-à-dire qu'ils n'ont pas cherché à fausser les informations fournies) pour deux raisons : d'une part, les enquêtes ont été réalisées par des techniciens que les éleveurs connaissaient (l'interlocuteur n'était pas une administration), et d'autre part, les informations fournies étaient cohérentes les unes avec les

¹ Notons que les prairies implantées en Ray-Grass anglais et trèfle blanc sont fréquentes sur ce bassin, mais d'une maîtrise technique difficile, car les étés sont généralement secs.

autres². Les exploitations enquêtées ont été classées, de façon relative, avec l'aide des conseillers qui avaient effectué l'enquête, sur la capacité des éleveurs à valoriser leur surface fourragère pour produire du lait. Un algorithme (Turpin, 2003, pp. 215-217) a ensuite été construit pour retrouver ce classement relatif.

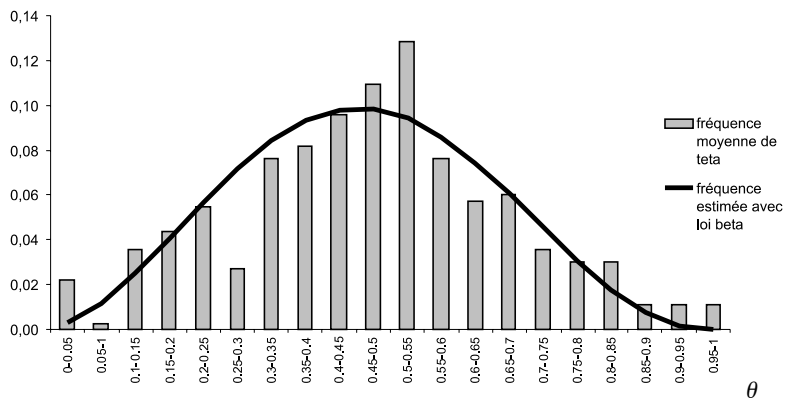
Ainsi, θ est une fonction de :

- la production des prairies qui est valorisée par les animaux,
- la moyenne d'étable (le lait produit par vache présente),
- l'équilibre de la ration de base (entre apports protéiques et énergétiques),
- la quantité de concentrés de production,
- la différence de lait produit par hectare entre une ration théorique établie avec des fourrages de bonne qualité et ce que l'on observe sur l'exploitation.

Un éleveur qui obtient une production importante d'herbe sur ses prairies, dont les vaches ont une moyenne d'étable élevée, qui leur fournit une ration de base équilibrant bien les apports énergétiques et protéiques avec des fourrages de qualité et qui a besoin de peu de concentrés de production, est considéré comme valorisant bien sa surface fourragère : il a par conséquent une caractéristique θ élevée.

Nous avons ensuite estimé la fonction de répartition du type θ sur notre échantillon. Cette fonction de répartition n'est pas symétrique par rapport à la moyenne des observations, aussi une forme beta a-t-elle été retenue pour cette fonction. Le test statistique de Smirnov-Kolmogorov nous a ensuite permis d'estimer les paramètres de la fonction de répartition (graphique 3).

Graphique 3.
Densité moyenne $f(\theta)$
et densité estimée par
une loi beta de
paramètres $a=3,2$ et
 $b=3,4$



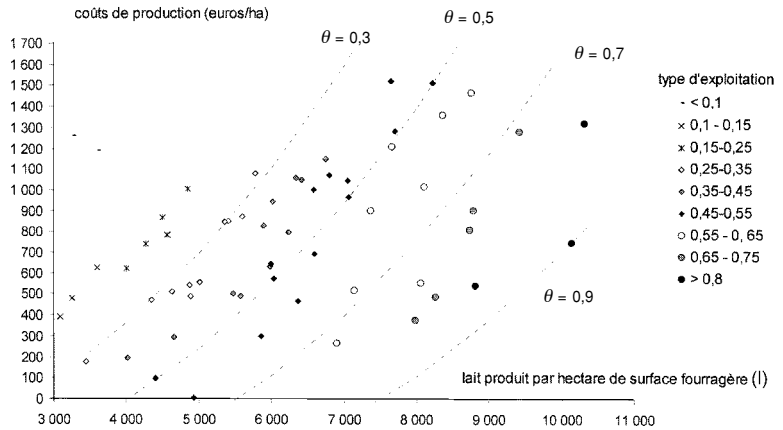
² Nous avons ainsi vérifié que les fourrages produits sur l'exploitation suffisaient à nourrir le troupeau, que les fertilisations annoncées correspondaient aux rendements déclarés et que, dans la mesure du possible, les coûts de production correspondaient au niveau d'intensification décrit par l'éleveur.

On suppose de manière usuelle que le coût de production du lait par hectare, $c(y, \theta)$, est donné par une forme quadratique (Yiridoe et Weersink, 1998):

$$c(y, \theta) = \alpha(\theta)y^2 + b(\theta)y + d(\theta)$$

Les paramètres de cette fonction de coût, selon le niveau de production laitière et le type des éleveurs, ont été estimés par maximum de vraisemblance (Gouriéroux et Montfort, 1995) sur l'échantillon enquêté³. Le coût estimé de production du lait pour les exploitations du Don est décrit dans le Graphique 4.

Graphique 4.
Coût de production par hectare estimé selon la production laitière et le type de l'agriculteur sur les exploitations enquêtées du Don



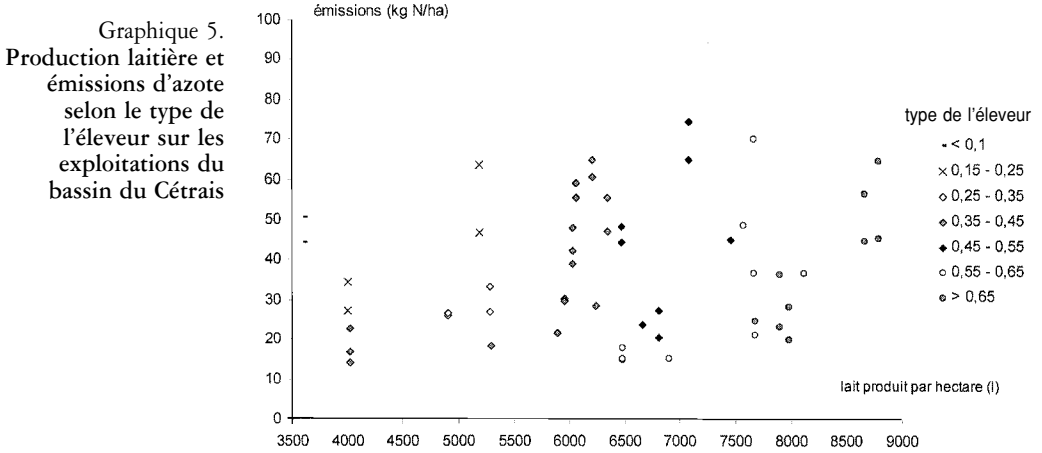
Estimation du dommage

Nous avons calibré sur le bassin du Don un modèle permettant de relier les pratiques des éleveurs et les émissions d'azote qui en découlent (Turpin *et al.*, 2001). Pour simplifier, les émissions d'autres polluants potentiels (phosphore, métaux lourds, pesticides) ont été négligées. Ce modèle prédit deux choses : un stock d'azote minéral présent dans le sol en début de période de drainage (par parcelle), et un flux d'azote vers l'eau (à l'exutoire du bassin versant).

Dans un premier temps, nous avons vérifié que ces deux quantités étaient compatibles avec les mesures effectuées sur le bassin (voir annexe 1). La qualité de représentation du modèle étant jugée satisfaisante sur plusieurs années, le modèle a été utilisé pour estimer statistiquement les émissions de nitrates depuis les parcelles agricoles des exploitations enquêtées (voir graphique 5). Cette estimation a été effectuée en année moyenne, ce qui nous permet d'écartier de l'analyse les effets liés aux variations inter-annuelles du climat. La fonction d'émiss-

³ Les estimations ont été réalisées sur un échantillon de 67 troupeaux laitiers et ont conduit à des estimateurs tous significatifs (voir Bontems *et al.*, 2003, pour plus de détails).

sion d'azote par unité de surface, depuis les parcelles, $g(y, \theta)$, est croissante en y et décroissante en θ . En d'autres termes, un éleveur habile pollue moins, toutes choses étant égales par ailleurs.



Dans notre population, nous constatons que plus l'éleveur utilise efficacement sa surface fourragère pour produire du lait (plus θ est élevé), moins il émet d'azote depuis ses parcelles, à production identique. Ce résultat n'était pas évident *a priori*, les éleveurs les plus habiles auraient très bien pu être aussi les plus pollueurs.

De la même façon que pour les coûts de fertilisation, une estimation des paramètres de la fonction d'émission des éleveurs en fonction de leur type a été effectuée avec la technique du maximum de vraisemblance (voir annexe 2).

Le dommage environnemental D , généré par ces émissions depuis les parcelles, est représenté par une fonction croissante et convexe des émissions totales à l'exutoire du bassin, E . Ces émissions sont estimées par la somme des émissions unitaires $g(y, \theta)$, ce qui revient à négliger d'éventuels processus d'épuration le long du chemin de l'eau dans le bassin, et ce qui est justifié par compatibilité du modèle avec les données mesurées dans l'eau (voir annexe 1).

Nous avons enfin, pour simplifier, considéré le coût du traitement des eaux brutes pour l'alimentation en eau potable, comme coût de ce dommage. Le coût technique des traitements provient de données des Agences de l'eau (Falala *et al.*, 2002). De fait, ce coût du traitement est une proxy du coût du dommage réel, qui demanderait pour être estimé plus précisément, d'avoir recours aux méthodes d'évaluation utilisées traditionnellement en économie de l'environnement. Néanmoins, cette hypothèse ne remet pas en cause la validité de notre démarche.

Nous allons maintenant examiner comment ce régulateur peut utiliser ces éléments pour construire un mécanisme incitant les éleveurs à révéler leur type à partir des éléments précédents.

CONSTRUCTION D'UN MÉCANISME INCITATIF

Objectif du régulateur

Les éleveurs du bassin sont hétérogènes sur deux paramètres, la surface (S) qu'ils peuvent consacrer à la production de fourrages pour leur troupeau laitier, d'une part, et leur type, θ , d'autre part. La surface S est observable sans coût et a une fonction de répartition $b(S)$. Le type de l'éleveur, θ , n'est pas observable, mais le régulateur connaît sa fonction de répartition par classe de surface, $f(\theta; S)$. Le problème du régulateur est de construire un mécanisme permettant de maximiser une fonction de bien-être social \mathcal{W} , égale à la somme des profits diminuée du coût social des transferts monétaires et du dommage environnemental⁴. En vertu du principe de révélation, il n'y a pas de perte de généralité à se limiter à l'étude des mécanismes directs et révélateurs. Le mécanisme recherché est donc différencié, chaque éleveur étant invité à choisir, dans un menu, une production laitière par hectare ($y(\theta)$) et une surface consacrée à cette production ($s(\theta)$), qu'il s'engage à réaliser par contrat. Il reçoit en échange une subvention personnalisée ($t(\theta)$)⁵. En vertu du principe de taxation (Guesnerie, 1998), ce menu de contrats est équivalent à une subvention non linéaire $t(y, s)$ dépendante des choix de production et d'assolement de l'éleveur.

Le menu de contrats optimal est obtenu en maximisant l'objectif du régulateur sous des contraintes d'auto-sélection et de participation :

- contraintes d'incitation : aucun éleveur n'a intérêt à choisir une production laitière ou une surface à lui consacrer qui ne corresponde pas à son type,
- contraintes de participation : chaque éleveur, après signature du contrat, a un profit au moins égal à un minimum fixé par le régulateur.

Dans ces conditions, le programme du régulateur s'écrit de la manière suivante :

$$\begin{aligned} \max_{y(\theta), s(\theta), t(\theta)} \mathcal{W} \equiv & \int_{\underline{S}}^{\bar{S}} \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} [\pi(\theta) + (1 + \lambda)t(\theta)] f(\theta; S) d\theta b(S) dS \\ & - D \left(\int_{\underline{S}}^{\bar{S}} \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} s(\theta) g(y(\theta), \theta) f(\theta; S) d\theta b(S) dS \right) \end{aligned}$$

⁴ Notons que cet objectif ne tient pas compte du surplus du consommateur. Le bassin versant sur lequel est appliquée la régulation est suffisamment petit et une variation de sa production n'influence pas le niveau des prix. Par ailleurs, comme indiqué plus haut, le coût du dommage réel est représenté ici uniquement par le coût de potabilisation des eaux brutes. Ceci revient à considérer que le régulateur ne prend réellement en compte que les coûts financiers apparents de la pollution.

⁵ Ou il lui est demandé de payer une taxe.

sous les contraintes

$$\pi(\theta) \geq \pi(\theta, \hat{\theta}) \quad (\text{contrainte d'incitation})$$

$$\pi(\theta) \geq \text{profit minimum} \quad (\text{contrainte de participation})$$

avec :

- $\pi(\theta)$ le profit de l'éleveur de type θ , donné par :

$$\pi(\theta) = (py(\theta) - c(y(\theta), \theta)) \cdot s(\theta) + t(\theta),$$

- θ le type réel d'un éleveur donné,
- $\hat{\theta}$ l'annonce de l'éleveur concernant son type,
- $\pi(\theta)$ le profit d'un éleveur annonçant son type réel,
- $\pi(\theta, \hat{\theta})$ le profit d'un éleveur θ qui annonce $\hat{\theta}$,
- $t(\theta)$ le transfert monétaire,
- λ le coût marginal social des fonds publics,
- $g(y(\theta), \theta)$ les émissions par unité de surface de l'éleveur θ qui produit la quantité $y(\theta)$ de lait par hectare,
- D le coût du dommage environnemental.

De façon formelle, caractériser le mécanisme optimal revient à déterminer les fonctions $s(\cdot)$, $y(\cdot)$ et $\pi(\cdot)$ (ou de façon équivalente le transfert $t(\cdot)$) qui maximisent la fonction de bien-être espéré du régulateur. La forme de la politique optimale dépend du niveau de profit minimal que le régulateur assure aux producteurs. Deux options sont envisagées : soit le niveau de profit minimal ne dépend pas du type de l'éleveur (dans ce cas, le mécanisme est qualifié d'autoritaire), soit au contraire ce niveau minimal dépend du profit (inconnu du régulateur) que chaque éleveur réalise avant mise en place de la régulation (le mécanisme est qualifié de politique).

Mécanisme incitatif sous contrainte de participation autoritaire

Dans un premier temps, nous avons considéré que le régulateur souhaite laisser aux éleveurs un niveau de profit minimal identique quel que soit leur type. On peut toujours normaliser ce profit minimum à zéro sans perte de généralité :

$$\pi(\theta) \geq 0, \quad \forall \theta$$

La résolution analytique du programme du régulateur produit le menu de contrat optimal que nous notons $(t^a(\theta), y^a(\theta), s^a(\theta))$ (voir Bontems *et al.*, 2003). Le mécanisme autoritaire revient alors :

- à écarter les éleveurs les moins habiles de la production, de sorte que l'ensemble des éleveurs restant en production pour la classe de surface potentielle S soit $[\hat{\theta}(S), \bar{\theta}]$. Le premier éleveur (de type $\hat{\theta}(S)$) que le régulateur autorise à produire est celui pour lequel le surplus margi-

nal (net du dommage) de la production est égal au coût marginal de l'incitation pour tous les éleveurs d'un type plus élevé: pour autoriser l'éleveur de type $\theta(S)$ à produire, le régulateur doit augmenter les rentes informationnelles de tous les éleveurs plus habiles pour les empêcher de se faire passer pour moins habiles qu'ils ne sont,

- à inciter les autres éleveurs à produire sur une surface $s^a(\theta) = S$ et au niveau $y^a(\theta)$ inférieur à ce qu'ils réalisaient avant régulation. Cette baisse des niveaux de production permet au régulateur de limiter le montant des rentes informationnelles à distribuer (en effet, cette rente est croissante avec le niveau de production).

Plus précisément, quel que soit S , quel que soit $\theta \in [\underline{\theta}(S), \bar{\theta}]$, le niveau optimal de production pour tout type d'éleveur (θ, S) est donné par:

$$p - c_y(y^a(\theta), \theta) = \frac{1}{1 + \lambda} D'(E^a) g_y(y^a(\theta), \theta) - \frac{\lambda}{1 + \lambda} c_{y\theta}(y^a(\theta), \theta) \frac{1 - F(\theta; S)}{f(\theta; S)} \quad (1)$$

avec E^a le niveau d'émission total, donné par:

$$E^a = \int_{\underline{S}}^{\bar{S}} \int_{\underline{\theta}(S)}^{\bar{\theta}} S g(y^a(\theta), \theta) f(\theta; S) d\theta b(S) dS$$

De plus, pour tout éleveur de type θ tel que $\underline{\theta} \leq \theta < \bar{\theta}$, la production n'est pas autorisée et $\pi^a(\theta) = 0$.

Les éleveurs restant en production reçoivent un transfert négatif:

$$t^a(\theta) = - \int_{\underline{\theta}(S)}^{\theta} c_{\theta}(y^a(u), u) s(u) du - (p y^a(\theta) - c(y^a(\theta), \theta)) S$$

L'équation (1) indique qu'à l'optimum, le prix est égal au coût marginal **ajusté**, qui se compose du coût marginal privé de production, du dommage marginal (positif) pondéré par le coût social des fonds publics, et du coût marginal (positif) des incitations. De ce fait, le niveau de production que le régulateur assigne à chaque éleveur de type (θ, S) est réduit par rapport à la situation de laissez-faire ($y^a(\theta) < y^o(\theta)$). De plus, le niveau total d'émissions E^a est diminué, d'une part, parce que les éleveurs les moins habiles sont incités à ne plus produire (donc à ne plus émettre de nitrates vers les eaux), et, d'autre part, parce que les éleveurs qui continuent à produire sont incités à diminuer leur production, donc à moins polluer.

Avec notre jeu de données, le régulateur a effectivement intérêt à l'optimum à ne pas laisser produire les éleveurs les moins habiles (graphique 6). Les éleveurs qui restent en activité ne sont autorisés à produire qu'une quantité inférieure à ce qu'ils produiraient avec un mécanisme en information parfaite (sauf les éleveurs les plus habiles, de type $\bar{\theta}$, qui peuvent produire plus). Le mécanisme autoritaire écarte de la production les éleveurs dont la valeur du type est inférieure à 0,22, ce qui représente

7 % des éleveurs. Il induit une diminution de production laitière sur le bassin de 13,5 % par rapport à la situation de laissez-faire (et une diminution de 9 % de la surface fourragère consacrée au lait). Avec le mécanisme autoritaire, le régulateur impose de plus aux éleveurs qui restent en activité une taxe (*i.e.* un transfert t^a négatif), d'autant plus importante que leur type est élevé. De ce fait, le profit des éleveurs est nettement réduit par rapport à la situation de laissez-faire : le profit total des éleveurs laitiers sur le bassin est diminué de 58,3 %.

Mécanisme sous contrainte de participation politique

Dans le mécanisme construit au paragraphe précédent, le profit que le régulateur laisse aux éleveurs est très faible (même s'il est positif), et tous les éleveurs subissent une perte du fait de la régulation. Le régulateur peut alors chercher à satisfaire tout ou partie de la population d'éleveurs, en introduisant une contrainte de participation plus souple (Lewis *et al.*, 1989). Nous considérons ici qu'il intègre dans son objectif la volonté qu'une proportion fixée d'éleveurs (que nous noterons a) obtienne un profit au moins aussi important après la régulation qu'avant. Supposons que la probabilité qu'un éleveur soit dans ce cas (et « apprécie » le mécanisme) soit donnée par la fonction $v(\pi(\theta) - \pi^o(\theta))$ telle que :

$$v(\pi(\theta) - \pi^o(\theta)) = \begin{cases} 0 & \text{si } \pi(\theta) < \pi^o(\theta) \\ 1 & \text{si } \pi(\theta) \geq \pi^o(\theta) \end{cases}$$

La mise en place du nouveau mécanisme nécessite l'ajout, au programme du régulateur, de la contrainte d'acceptabilité suivante :

$$\int_{\underline{S}}^{\bar{S}} \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} v(\pi(\theta) - \pi^o(\theta)) f(\theta; S) d\theta b(S) dS \geq \alpha$$

Le menu de contrats optimal est déterminé en deux étapes :

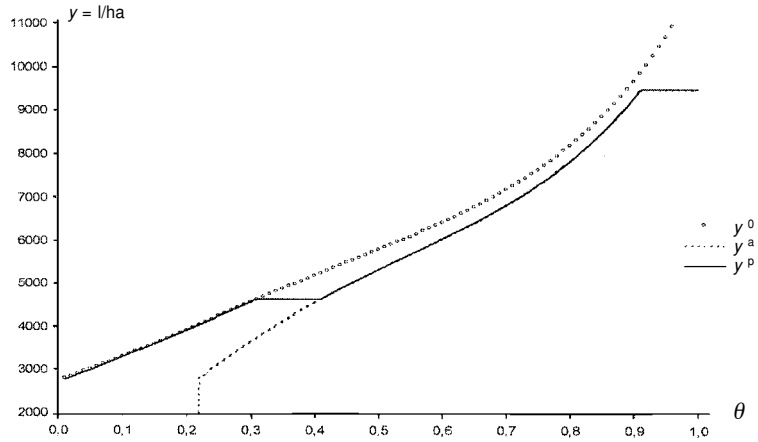
- dans un premier temps, nous caractérisons la solution pour chaque classe de surface S étant donné une proportion exogène $\alpha(S)$ d'agriculteurs appartenant à cette classe qui bénéficient de la régulation,
- dans un second temps, nous déterminons l'allocation optimale de ces proportions $\alpha(S)$.

Notons $y^b(\theta), s^b(\theta), \pi^b(\theta)$, l'allocation optimale de second rang offerte à tout éleveur de type θ exploitant potentiellement une surface fourragère S . La proportion α d'éleveurs bénéficiant de la régulation va influencer à la fois sur le niveau de pollution (et donc le dommage) et sur le bénéfice net que le régulateur tire de la régulation. Pour les éleveurs de types les plus faibles, le niveau de production est déterminé en égalisant le surplus marginal de production (pondéré par son coût social) au dommage marginal plus une distorsion négative liée aux contraintes d'incitation. Cette distorsion revient à augmenter la production autorisée sur une surface

donnée par rapport à ce que l'on obtiendrait avec le mécanisme autoritaire. Pour ces éleveurs de type faible, le niveau de production réalisé sous la contrainte politique est donc compris entre la production de *statu quo* et celle du mécanisme autoritaire (graphique 6)⁶.

A l'optimum, le niveau de production des éleveurs de type plus important est déterminé de façon à ce que le surplus marginal de production (pondéré par son coût social) soit égal au dommage marginal plus une distorsion positive. L'application indique en outre que ces niveaux de production sous mécanisme politique sont très légèrement inférieurs à ceux obtenus avec le mécanisme autoritaire.

Graphique 6.
Production laitière à l'hectare en fonction du type θ de l'éleveur dans la situation de laissez-faire (y^0), sous le mécanisme autoritaire (y^a) et sous le mécanisme politique (y^p)



Pour le régulateur, introduire cette contrainte de participation politique va satisfaire plus d'éleveurs que s'il essaie d'imposer le mécanisme autoritaire. Cette satisfaction se traduit néanmoins par une émission de polluants plus importante vers l'eau, et des transferts (coûteux) plus élevés vers les agriculteurs. Plus le régulateur cherche à satisfaire d'éleveurs, plus son bénéfice net est faible (tableau 1).

Tableau 1. Bénéfice net du régulateur et émissions d'azote en fonction du pourcentage d'agriculteurs bénéficiant de la régulation

% d'agriculteurs bénéficiant de la régulation	0 %	25 %	50 %	75 %
Emissions d'azote (en % des émissions au <i>statu quo</i>)	53 %	75 %	78 %	91 %
Gain de bien-être du régulateur (en %)	+ 18,4 %	+ 0,6 %	+ 0,4 %	+0,1 %

⁶ Notons que le mécanisme politique n'est pas séparable pour les types élevés et pour certaines valeurs intermédiaires (voir Bontems *et al.*, 2003).

COMPARAISON AVEC D'AUTRES POLITIQUES

La construction d'un mécanisme non linéaire peut s'avérer, en pratique, délicate à mettre en place. Autant dans certains domaines comme l'enlèvement des ordures ménagères, des tarifications non linéaires sont courantes (Pierron et Le Bozec, 2005), autant elles sont encore inexistantes en agriculture. Des mécanismes linéaires peuvent sembler plus simples à appliquer dans ce domaine. Nous allons examiner quels seraient la production laitière, le profit des éleveurs et les émissions de polluants que l'on peut attendre avec la mise en place de certains mécanismes linéaires, mais aussi quelle peut être la perte d'efficacité résultant de ces mécanismes linéaires par rapport à la tarification non linéaire précédente. Nous considérerons successivement une taxe linéaire sur les quantités d'azote consommées («taxe N»), une diminution proportionnelle du niveau de production («ext.»), puis un quota uniforme d'engrais («quota N»).

Pour chacun de ces mécanismes, le régulateur cherche à maximiser une fonction de bien-être social \mathbb{W} , égale à la somme des profits diminuée du coût social des transferts monétaires et du dommage environnemental. Cette fonction a une forme différente selon l'instrument choisi par le régulateur (voir annexe 3). Le niveau de chaque instrument (taxe par kilogramme d'engrais consommé, niveau d'extensification, niveau du quota d'utilisation d'engrais) est déterminé de façon endogène par la maximisation de \mathbb{W} . Chacun de ces mécanismes conduit à une valeur du bénéfice net du régulateur, d'une part, et à une diminution des quantités d'azote émises dans l'eau (cette diminution correspondant à une quantité d'azote «évitée»), d'autre part, valeurs qui seront différentes d'un mécanisme à l'autre. Nous n'avons pas, dans un premier temps, considéré que le régulateur se fixait d'objectif en matière de qualité de l'eau, mais nous supposons qu'il cherche simplement à maximiser le bien-être social avec chacun des instruments.

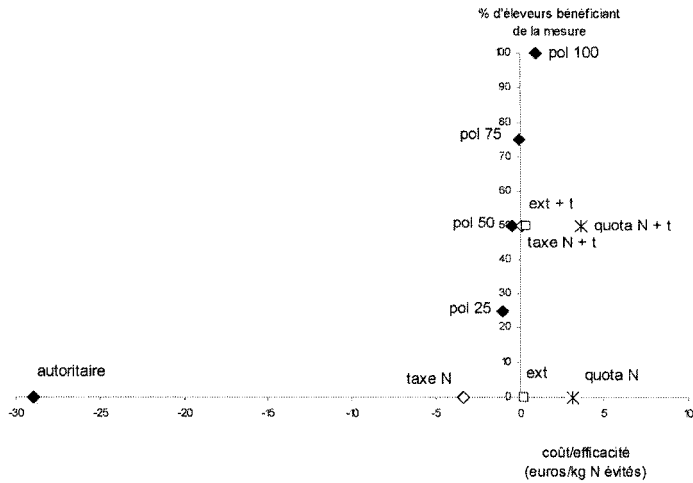
Nous sommes ainsi amenés à comparer (voir graphique 7):

- le mécanisme autoritaire, noté «autoritaire»,
- le mécanisme politique, avec plusieurs valeurs possibles pour la proportion d'éleveurs bénéficiant de ce mécanisme, noté «pol25» lorsque $\alpha = 0,25$,
- une taxe sur les engrais consommés, dont le niveau est déterminé de façon à maximiser l'objectif du régulateur («taxe N»),
- une taxe sur les engrais, au même niveau, mais associée à une subvention conçue de façon à ce que la moitié des éleveurs réalisent après régulation un profit au moins égal à celui qu'ils obtenaient avant («taxe N + t»),
- une mesure d'extensification, via la diminution proportionnelle du niveau de production, diminution déterminée de façon à maximiser

l'objectif du régulateur (« ext. »), et la même mesure associée à un transfert compensatoire conçu de façon à ce que la moitié des éleveurs réalisent après régulation un profit au moins égal à celui qu'ils obtenaient avant (« ext. + t »),

- un quota d'engrais, noté « quota N » lorsqu'il n'est associé à aucune subvention, et « quota N + t » lorsqu'il est accompagné d'un transfert compensatoire (le transfert étant construit de façon à ce que la moitié des éleveurs réalisent après régulation un profit au moins égal à celui qu'ils obtenaient avant).

Graphique 7.
Proportion d'éleveurs
bénéficiant de la
mesure en fonction
du ratio coût/efficacité
pour différentes
régulations sur le
bassin versant du Don



L'utilité du régulateur est maximale pour un niveau de taxe sur les engrais très élevé par rapport au prix d'achat de ces engrais par les éleveurs : le niveau de taxe est ainsi de 1,26 €/kg N évité, pour un coût des engrais d'environ 0,5 €/kg N, ce qui correspond au coût (négatif) de la mesure de - 3,39 €/kg N évité porté sur le graphique. Avec ce niveau de taxe, certains éleveurs réaliseraient un profit négatif⁷. Cette taxe se traduit par un bénéfice net pour le régulateur, la perte de surplus des producteurs étant compensée par la recette de la taxe et le moindre coût du dommage.

Imposer une extensification uniforme, chaque éleveur diminuant sa production laitière dans la même proportion par rapport au niveau de *statu quo*, se traduit par un coût net pour le régulateur puisque le surplus des producteurs diminue et que leur perte est supérieure au gain en matière de réduction des dommages. Par ailleurs, contrairement à la taxe sur les engrais, le mécanisme d'extensification ne génère aucune recette

⁷ Notons que si le régulateur cherche à fixer une taxe telle qu'aucun des éleveurs ne réalise de profit négatif, le niveau de taxe optimal devient 0,23 €/kg N évité. Ce niveau est proche du niveau de taxe sur les engrais minéraux fixé en Suède.

budgétaire. Ce coût est plus faible que si le régulateur impose un quota d'engrais (0,27 €/kg N évité contre 3,2 €/kg N évité avec le quota d'engrais). En effet, ce dernier instrument pénalise plus les éleveurs peu efficaces, pour qui diminuer les quantités d'engrais utilisés revient à diminuer la production laitière de façon importante.

Les éleveurs pâtissent tous de ces trois mécanismes linéaires. Notons qu'un mécanisme différencié, sans être plus profitable aux éleveurs, génère cependant une augmentation du bien-être du régulateur supérieure à celle générée par les trois mécanismes linéaires analysés. Le bénéfice par unité d'azote évitée dans l'eau du mécanisme différencié est près de huit fois supérieur à celui généré par une taxe linéaire sur les engrais, et l'accroissement d'utilité nette est près de dix fois supérieur.

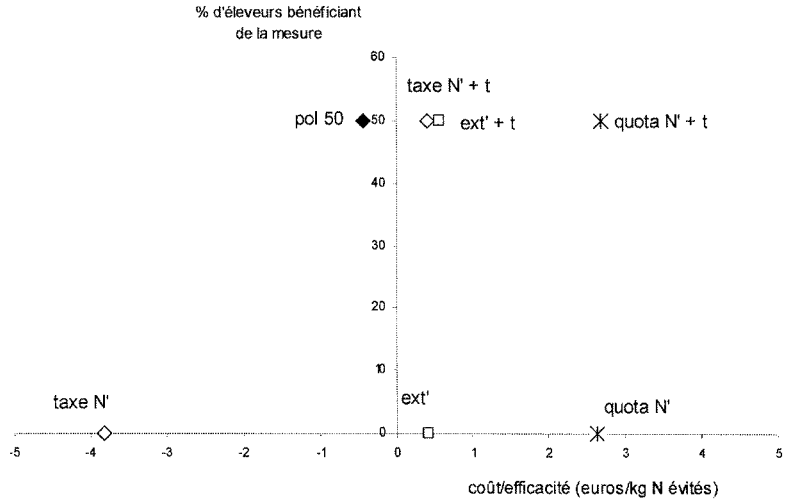
Associer à chaque mécanisme une subvention destinée à compenser au moins la perte de profit d'une proportion donnée d'éleveurs (sur le graphique 7 cette proportion est de 50 %) conduit à augmenter leur coût, sans modifier l'ordre dans lequel ils apparaissent si on les classe par coût croissant. Avec 50 % d'éleveurs bénéficiant de la régulation, seul le mécanisme différencié génère encore un bénéfice pour le régulateur.

Dans un second temps, nous avons considéré que le régulateur se fixait un objectif supplémentaire de qualité des eaux: le régulateur s'impose la contrainte supplémentaire d'atteindre une qualité moyenne des eaux, par exemple pour satisfaire une exigence européenne. Le régulateur résout le même programme que précédemment, avec simplement une contrainte supplémentaire. Nous avons aussi considéré que chacun de ces instruments pouvait être associé à une subvention destinée à ce qu'une proportion donnée d'éleveurs bénéficient de la régulation.

La comparaison des différents instruments est rendue malaisée lorsqu'ils conduisent à des qualités d'eau différentes et satisfont des proportions inégales d'agriculteurs. Nous nous sommes alors imposé de n'effectuer des comparaisons que pour des instruments satisfaisant la même contrainte de qualité d'eau et permettant à une proportion identique d'agriculteurs de réaliser, après régulation, un gain de profit. L'application empirique suggère que le mécanisme non linéaire que nous avons qualifié de «politique» permet d'atteindre une eau de qualité selon le critère européen de 25 mg/l de nitrates lorsque la moitié des agriculteurs réalisent après régulation un gain de profit. Nous nous sommes donc fixé comme contraintes pour l'élaboration des mécanismes linéaires cette valeur guide européenne de 25 mg/l de nitrates dans l'eau comme valeur à ne pas dépasser, et la proportion de 50 % d'agriculteurs à satisfaire.

Nous comparons les instruments décrits dans le graphique 7, à un niveau noté *prime*, qui permet d'atteindre la valeur guide européenne de 25 mg/l de nitrates (notés respectivement «taxe N'», «quota N'», «ext.'» dans le graphique 8).

Graphique 8.
 Comparaison de
 divers instruments
 permettant d'atteindre
 la valeur guide
 25 mg/l de nitrates
 sur le bassin du Don,
 selon le coût par kg
 d'azote évité et
 la proportion
 d'éleveurs bénéficiant
 de la mesure



Pour un régulateur, se fixer comme contrainte supplémentaire d'atteindre la valeur guide européenne 25 mg/l de nitrates a des conséquences différentes selon l'instrument adopté. Il lui faudrait ainsi fixer une taxe sur les engrais à 0,56 €/kg N pour atteindre cette valeur guide, ce qui induirait un bénéfice du mécanisme plus important qu'avec le niveau précédent de taxe: le coût négatif de la taxation permettant d'atteindre la valeur guide européenne est de -3,81 €/kg N évité (il était de -3,39 €/kg N évité pour la taxe maximisant l'utilité du régulateur). En effet, la perte de ressources fiscales liée à ce nouveau niveau de taxe est ici compensée par une diminution plus faible du surplus des producteurs. Notons que dans ce cas, le coût du dommage est plus important et de ce fait, l'utilité du régulateur est bien inférieure à celle obtenue pour le niveau précédent de taxe (nous avons ici un gain d'utilité pour le régulateur de 0,9 % par rapport à la situation non régulée, alors que le niveau précédent de taxe permettait un gain d'utilité de 1,7 %).

Le coût de la mesure est augmenté pour l'extensification linéaire lorsque le régulateur souhaite atteindre la qualité d'eau requise par l'Union européenne (ce coût passe de 0,27 €/kg N évité lorsque le régulateur maximise simplement son utilité à 0,43 €/kg N évité). Notons que le coût de la mesure est réduit par rapport à la situation maximisant l'utilité du régulateur si ce dernier utilise un quota d'engrais (ce coût passe de 3,17 €/kg N évité lorsque le régulateur maximise simplement son utilité à 2,63 €/kg N évité). En effet, diminuer la quantité d'engrais utilisable revient à affecter des éleveurs de plus en plus efficaces et donc à réduire le coût global de la mesure (le coût étant ici la somme du surplus des producteurs et du coût social des fonds publics) par unité d'azote évitée dans l'eau.

Les simulations réalisées sur le bassin du Don suggèrent ainsi que de nombreux mécanismes peuvent être élaborés pour limiter les fuites de

nitrites sous la valeur guide de 25 mg/l, même en région d'élevage intensif. Ces mécanismes se différencient par le coût qu'ils induisent et la proportion d'agriculteurs qui en bénéficient (ou qui l'acceptent). Par ailleurs, appliquer des mécanismes non linéaires (par le biais de contrats ou de taxations progressives) permet d'atteindre des niveaux d'acceptabilité importants, tout en dégageant un bénéfice pour la société. En particulier, le mécanisme non linéaire décrit ici permet, sur un bassin versant d'élevage intensif comme celui du Don, d'obtenir une qualité d'eau compatible avec les exigences européennes, d'augmenter le profit de la moitié des éleveurs et de réaliser un bénéfice social.

CONCLUSION

Dans ce travail, nous avons comparé une taxation non linéaire du niveau de production à des politiques uniformes basées sur la réduction d'intrants, la diminution du niveau de production ou imposant un quota d'engrais minéraux. Cette comparaison a été menée à l'aide d'un modèle s'appuyant sur la théorie de l'Agence et alimenté par des données provenant du bassin versant du Don.

Les principaux résultats obtenus sont de deux ordres. D'une part, le mécanisme non linéaire basé sur le niveau de production génère, par rapport à la situation non régulée, le plus grand accroissement de bénéfice net du régulateur, à proportion identique d'éleveurs bénéficiant de la régulation. En particulier, lorsque cette proportion est nulle (tous les éleveurs pâtissent de la régulation), le gain avec ce mécanisme est près de dix fois supérieur à celui obtenu par une taxation linéaire optimale des intrants.

D'autre part, sur le bassin du Don, qui est consacré à un élevage intensif, nous avons mis en évidence plusieurs politiques permettant de respecter la valeur guide européenne de 25 mg de nitrates par litre d'eau (en année moyenne). Parmi ces politiques, le mécanisme non linéaire est le seul qui conduise à un bénéfice social positif. Il est ainsi possible, même sur un bassin d'élevage intensif, d'élaborer une régulation des pollutions diffuses par l'azote qui bénéficie à la moitié des éleveurs, tout en respectant les exigences européennes en matière de qualité d'eau, et en dégageant un bénéfice social.

Ces résultats ont été obtenus sous un certain nombre d'hypothèses restrictives (en particulier, les interactions entre différents types de production ont été négligées). Néanmoins, ceci ne remet pas en cause l'intérêt mis en évidence dans ce papier d'élaborer des régulations différenciées selon les caractéristiques individuelles des éleveurs, même si celles-ci ne sont pas observables.

BIBLIOGRAPHIE

- Bontems Ph., Rotillon G. and Turpin N. (2003). Acceptability constraints and self-selecting agri-environmental policies, mimeo, 45 p. (<http://www.bordeaux.cemagref.fr/adbx/agribmpwater/publis>)
- Falala J., Lefèvre J., Mérillon Y. et Davy Th. (2002). Test de méthode d'analyse économique pour la mise en œuvre de la directive cadre sur l'eau, *in*: Lille III: From Economic Enigma to Operational Reality - Implementing the Economic Elements of the Water Framework Directive, Lille, Agence de l'eau Seine Normandie (éd.), 13 p.
- Flory J.-Cl. (2003). Les redevances des agences de l'eau, rapport au Premier Ministre, octobre, 180 p.
- Gouriéroux Ch., Montfort A. (1995). *Statistics and Econometrics Models*, Cambridge University Press, vol. 1, 504 p.
- Guesnerie R. (1998). *A Contribution to the Pure Theory of Taxation*, Cambridge University Press, 299 p.
- Lewis T. R., Feenstra R. and Ware R. (1989). Eliminating price supports: a political economy perspective, *Journal of Public Economics*, 40, pp. 159-185.
- Pierron E., Le Bozec A. (2005). La modernisation du financement du service des déchets ménagers par l'introduction d'une redevance incitative au tri des emballages, *in*: Economie des équipements pour l'eau et l'environnement, Terreaux J.-Ph. (éd.), *Cemagref*, sous presse.
- Shortle J. S., Horan R. D. (2001). The economics of nonpoint pollution control, *Journal of Economic Surveys*, 15, 3, pp. 255-289.
- Turpin N., Granlund K., Bioteau Th., Rekolainen S., Bordenave P. and Birgand F. (2001). Testing of the Harp guidelines #6 and #9, last report: results, Rennes, *Cemagref* and FEI, 43 p.
- Turpin N. (2003). Incitation à l'adoption de meilleures pratiques agricoles et lutte contre la pollution diffuse en présence d'asymétries d'information, thèse de doctorat, Université Paris X-Nanterre, 368 p.
- Wu Jun J., Babcock B. A. (1996). Contract design for the purchase of environmental goods from agriculture, *American Journal of Agricultural Economics*, 78, pp. 935-945.
- Yiridoe E.K., Weersink A. (1998). Marginal abatement costs of reducing groundwater-N pollution with intensive and extensive farm management choices, *Agricultural and Resource Economics Review*, 27, 2, pp. 169-185.

ANNEXE 1

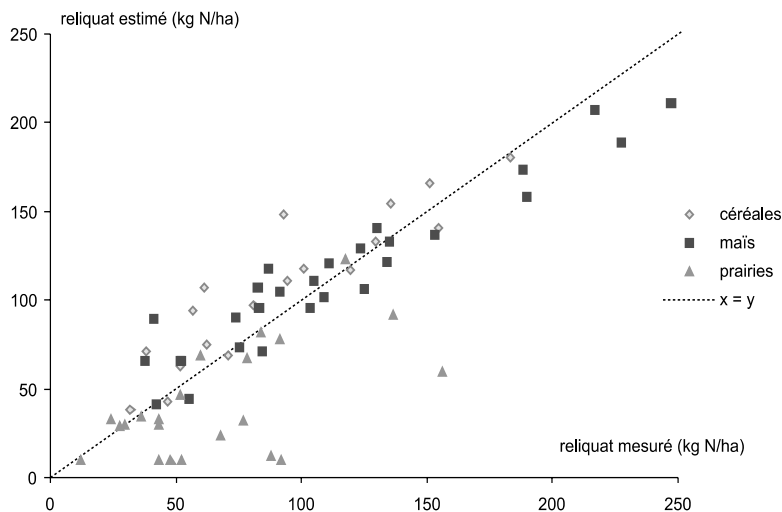
Modèle utilisé pour estimer les émissions des éleveurs

Le modèle utilisé (Turpin *et al.*, 2001) prédit :

- un stock d'azote minéral présent dans le sol en début de période de drainage, par parcelle, qui peut être comparé à des mesures de reliquats azotés effectuées sur quelques parcelles à la même période,
- un flux de nitrates dans l'eau à l'exutoire du bassin versant, que l'on peut comparer aux flux mesurés.

Sur un échantillon de parcelles du bassin du Don, nous avons comparé les quantités estimées d'azote minéral présentes dans le sol à l'automne avec des mesures de reliquats azotés à la même période (voir graphique 9). Le coefficient de Sutton Rathcliffe, qui mesure la qualité de représentation du modèle, est de 0,70 dans ce cas⁸.

Graphique 9.
Quantités d'azote estimées par modèle et mesurées dans un échantillon de parcelles du Don (Sutton Rathcliffe = 0,70)

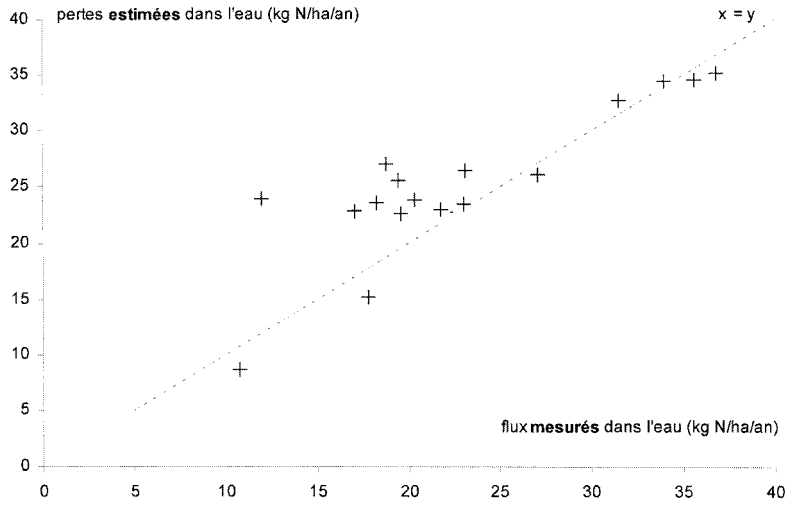


Les flux dans l'eau estimés par le modèle ont ensuite été comparés aux flux observés dans l'eau (voir graphique 10) en sommant l'effet de chaque parcelle sur différents sous-bassins et sur plusieurs années. Les variations potentielles de flux liées au transport des polluants des parcelles vers les eaux et dans le réseau hydrographique sont négligeables sur ce bassin. Le modèle représente les flux mesurés à l'exutoire du bassin sur plusieurs années avec une précision

⁸ L'estimation du reliquat sous prairie implantée en ray-grass anglais associé à du trèfle blanc est encore loin d'être parfaite pour la fraction ammoniacale (ce qui est représenté sur la figure), mais elle est très correcte si l'on ne considère que la fraction nitrique.

comparable aux erreurs sur les mesures réalisées (coefficient de Sutton Rathcliffé = 0,62).

Graphique 10.
Flux de nitrates dans
l'eau, estimés par le
modèle calibré sur le
Cétrais, et mesurés
(Sutton-
Rathcliffé = 0,62)



ANNEXE 2

Estimation des paramètres de la fonction d'émission

De la même façon que pour les coûts de fertilisation, une estimation des paramètres de la fonction d'émission des éleveurs en fonction de leur type a été effectuée avec la technique du maximum de vraisemblance. Cette fois, nous avons dû contraindre l'estimation, en utilisant des limites pour les paramètres, de façon à ce que les émissions d'azote depuis les parcelles d'un éleveur ne puissent être négatives pour les niveaux de production laitière observés. Le tableau ci-dessous décrit les estimations de ces paramètres.

Tableau 2. Estimation des paramètres de la fonction d'émission

Paramètres de la fonction d'émission estimée					
$g(y, \theta) = (\alpha_1 \theta^2 + \alpha_2 \theta + \alpha_3)(y - a)^2 + (\beta_1 \theta^2 + \beta_2 \theta + \beta_3)(y - b) + (\gamma_1 \theta^2 + \gamma_2 \theta + \gamma_3)$					
Paramètres pour $\alpha(\theta)$		Paramètres pour $\beta(\theta)$		Paramètres pour $\gamma(\theta)$	
α_1°	$6,978 \cdot 10^{-6}$	β_1°	0,0120	γ_1^*	29,379
α_2^*	$-1,000 \cdot 10^{-5}$	β_2^*	- 0,0524	γ_2^*	- 12,980
α_3°	$7,668 \cdot 10^{-6}$	β_3^*	0,0139	γ_3^*	17,280

° valeur contrainte (de façon à obtenir des émissions non négatives)

* coefficient significativement différent de 0 à 5 %

ANNEXE 3

Formes fonctionnelles des instruments linéaires

Taxe sur les engrais minéraux

Le régulateur peut choisir d'imposer une taxe τ sur les engrais minéraux utilisés par l'éleveur. Une fois la taxe appliquée, le coût de production de l'éleveur devient $C(\tau, y, \theta)$ avec :

$$C(\tau, y, \theta) = c(y, \theta) + \tau x(y, \theta)$$

avec $x(y, \theta)$ la quantité d'engrais utilisée par hectare pour l'éleveur de type θ qui produit la quantité y de lait. Le profit de l'éleveur soumis à la taxe s'écrit :

$$\pi(y, \tau, \theta) = (py - c(y, \theta) - \tau x(y, \theta))S$$

Le régulateur détermine la taxe linéaire qui maximise la fonction de bien-être global \mathcal{W}^τ , composée du profit des éleveurs, du surplus total des contribuables (avec un coût social des fonds publics égal à $1 + \lambda$) et du dommage environnemental :

$$\begin{aligned} \mathcal{W}^\tau = & \int_{\underline{S}}^{\bar{S}} \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} [\pi(y, \tau, \theta) + (1 + \lambda)\tau S x(y, \theta)] f(\theta; S) d\theta b(S) dS \\ & - D \left(\int_{\underline{S}}^{\bar{S}} \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} S g(y, \theta) f(\theta; S) d\theta b(S) dS \right) \end{aligned}$$

Le régulateur peut choisir d'assortir une taxe linéaire sur les quantités d'engrais consommées (τ) d'un transfert par unité de surface. Nous noterons t la valeur de ce transfert. Ce transfert est destiné à ce qu'une proportion α des éleveurs bénéficie de la régulation. Le profit de l'éleveur de type θ soumis à une taxe linéaire sur les engrais et bénéficiant d'un transfert s'écrit :

$$\pi(y, \tau, t, \theta) = [py - c(y, \theta) - \tau x(y, \theta)] S + t$$

Puisque le transfert est uniforme, l'éleveur va déterminer son niveau de production optimal, y^τ , de la même façon que lorsque qu'il est confronté à une taxe linéaire. Son niveau de production est donné par l'équation :

$$p = c_y(y^\tau, \theta) + \tau x_y(y^\tau, \theta)$$

La fonction de bien-être global du régulateur sera alors la somme du profit des éleveurs, du surplus total des contribuables (qui doivent financer le transfert ou bénéficier de la taxe) pondéré par son coût social, et du dommage environnemental :

$$\begin{aligned} \mathcal{W}^{\tau t} = & \int_{\underline{S}}^{\bar{S}} \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} [\pi(y, \tau, t, \theta) + (1 + \lambda)\tau S x(y, \theta) - (1 + \lambda)t] f(\theta; S) d\theta b(S) dS \\ & - D \left(\int_{\underline{S}}^{\bar{S}} \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} S g(y, \theta) f(\theta; S) d\theta b(S) dS \right) \end{aligned}$$

La comparaison des différents instruments est rendue malaisée lorsqu'ils résultent en des qualités d'eau différentes et satisfont des proportions inégales d'agriculteurs. Nous nous sommes alors imposé de n'effectuer des comparaisons que pour des instruments satisfaisant la même contrainte de qualité d'eau et permettant à une proportion identique d'agriculteurs de réaliser après régulation un gain de profit. L'application empirique suggère que le mécanisme non linéaire que nous avons qualifié de « politique » permet d'atteindre une eau de qualité selon le critère européen de 25 mg/l de nitrates lorsque la moitié des agriculteurs réalisent après régulation un gain de profit. Nous nous sommes donc fixé comme contraintes pour l'élaboration des mécanismes linéaires cette valeur guide européenne de 25 mg/l de nitrates dans l'eau comme valeur à ne pas dépasser, et la proportion de 50 % d'agriculteurs à satisfaire. Dans ce cas, le régulateur cherchera à maximiser $\mathcal{W}^{\pi^{50}}$ donné par :

$$\begin{aligned} \mathcal{W}^{\pi^{50}} = & \int_{\underline{S}}^{\bar{S}} \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} S [(c_y(y, \theta) + \tau x_y(y, \theta))y - c(y, \theta) + \lambda \tau x(y, \theta)] f(\theta; S) d\theta b(S) dS \\ & - \lambda t \int_{\underline{S}}^{\bar{S}} \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} f(\theta; S) d\theta b(S) dS \\ & - D \left(\int_{\underline{S}}^{\bar{S}} \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} S g(y, \theta) f(\theta; S) d\theta b(S) dS \right) \end{aligned}$$

sous les contraintes :

$$p = c_y(y, \theta) + \tau x_y(y, \theta)$$

$$\alpha \leq \int_{\underline{S}}^{\bar{S}} \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} v(\pi(\theta) - \pi^o(\theta)) f(\theta; S) d\theta b(S) dS$$

$$E = \int_{\underline{S}}^{\bar{S}} \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} S g(y, \theta) f(\theta; S) d\theta b(S) dS$$

$$\alpha = 0,50$$

Extensification linéaire

Nous supposerons ici que le régulateur est capable de vérifier à peu de frais l'application de cette régulation : nous supposerons qu'il peut observer facilement S la surface fourragère consacrée par chaque éleveur à la production laitière, et y^o le niveau de production de lait par unité de surface dans la situation de laissez-faire. Dans ces conditions, le régulateur peut chercher à imposer aux éleveurs une diminution linéaire du niveau de production, la surface consacrée au troupeau laitier restant la même. Ce mécanisme revient à demander aux éleveurs de désintensifier la production laitière par rapport à la terre, de façon homogène. Notons r le coefficient de désintensification que le régulateur impose aux éleveurs ($r < 1$). Le profit d'un éleveur de type θ devient après régulation :

$$\pi(\theta, S, r) = (p r y^o - c(r y^o, \theta)) S + t$$

avec y^o tel que $p - c_y(y^o, \theta) = 0$.

Le régulateur a, avec ce mécanisme aussi, une fonction de bien-être global qui somme le profit des éleveurs, le transfert nécessaire pour la régulation et le dommage :

$$W^\tau = \int_{\underline{S}}^{\bar{S}} \int_{\underline{\theta}}^{\bar{\theta}} (\pi(\theta, S, \tau) - (1 + \lambda)St) f(\theta, S) d\theta b(S) dS - D(E^\tau)$$

Quota d'engrais

Sous l'hypothèse qu'un tel mécanisme soit vérifiable à peu de frais, le régulateur peut déterminer un standard d'utilisation d'engrais minéraux par hectare consacré au troupeau laitier. Après régulation, le profit de l'éleveur de type θ s'écrira :

$$\pi(\theta, X) = (py - c(y, \theta))S + t$$

l'éleveur cherchant à maximiser ce profit sous la contrainte :

$$x(y, \theta) \leq X$$

avec $x(y, \theta)$ la quantité d'engrais minéraux par hectare que l'éleveur utilise pour produire ses fourrages.

