



The World's Largest Open Access Agricultural & Applied Economics Digital Library

This document is discoverable and free to researchers across the globe due to the work of AgEcon Search.

Help ensure our sustainability.

Give to AgEcon Search

AgEcon Search

<http://ageconsearch.umn.edu>

aesearch@umn.edu

*Papers downloaded from **AgEcon Search** may be used for non-commercial purposes and personal study only. No other use, including posting to another Internet site, is permitted without permission from the copyright owner (not AgEcon Search), or as allowed under the provisions of Fair Use, U.S. Copyright Act, Title 17 U.S.C.*

No endorsement of AgEcon Search or its fundraising activities by the author(s) of the following work or their employer(s) is intended or implied.

La consommation d'engrais azotés en France Une prospective pour 2010

Nathalie TAVERDET-POPIOLEK

**The French nitrogen
fertilizer consumption.
Prospects for 2010**

Key-words:

global prospective, systemic
analysis, model,
simulations, Delphi,
agriculture, CAP,
nitrogen fertilization

La consommation
d'engrais azotés en
France.
Une prospective
pour 2010

Mots-clés:

prospective globale,
analyse systémique,
modélisation, simulations,
Delphi, agriculture,
PAC, fertilisation azotée

Summary – The protection of the environment is nowadays a major goal for our society and its importance will probably get highly amplified in the near future. Farmers are pointed at because, through their use of fertilizers, they are responsible for a diffuse pollution of rivers and phreatic sheets. At the same time, these farmers are facing economic difficulties due to the steady decrease of agricultural prices in the European Community. Therefore, they try to reduce production costs by a better management of their intermediate consumptions (mostly fertilizers).

Given this context, what will be in fifteen years the consumption of fertilizers in France? The aim of this paper is to answer this question by studying several scenarios based on the evolution of the economical, political and technological context. The future Common Agriculture Policy will certainly be the factor that will most affect this evolution.

We focus only on nitrogen fertilizers, which are supposed to be the main responsables for the pollution of phreatic sheets and which use can be rationalized. However, the methodology used to determine future consumption is easily applicable to other inputs (potassic and phosphoric fertilizers, phytosanitary, seeds, energy...).

The goal of this research is twofold:

* On the one hand, we build a prospective model representing the agricultural sector and the fertilizer industries in order to estimate (by simulations) the fertilizer consumption in 2010. No existent methodology can readily be used. We propose a methodology drawing on Yves Barel's thinking (1971) and on systemic analysis, that implies the interaction of modelling, expertizing and simulations. We apply it to the agriculture sector and to the fertilizer industry but it is applicable to other sectors.

* On the other hand, in addition to punctual results, this research aims at drawing a global prospective design of the French agriculture sector in 2010.

The results of our prospective study show that, by the year 2010, the consumption of nitrogen fertilizers should clearly decrease. Such a decrease is mainly explained by a more rational use of fertilizers by farmers, due to the increased "environmentalists" pressure, whose lobby is represented at Bruxelles and in each French administrative region. Relevant technological innovations are spreading and should help farmers improve their fertilizing techniques.

Résumé – Déterminer en 2010, la consommation d'engrais azotés en France nécessite d'étudier les perspectives d'évolution du secteur agricole et de l'industrie chimique des engrais. Cela relève de la prospective globale.

Or, si au niveau de l'entreprise, on dispose de toute une panoplie d'outils pour faire de la prospective, le problème devient beaucoup plus délicat dès lors que l'on veut projeter des secteurs entiers de l'économie. En effet, le système à considérer est très vaste et les outils d'entreprise ne suffisent pas.

La méthode que nous proposons ici permet de combler cette lacune car elle est aisément généralisable à d'autres études prospectives globales. Elle exploite la complémentarité pouvant exister entre modélisation, dires d'experts et simulations.

Au-delà de cet apport méthodologique (et des résultats ponctuels qui en découlent), ce papier donne une vision prospective globale de l'agriculture en 2010.

* Institut pour le management de la recherche et de l'innovation (IMRI) et Université Paris-Dauphine 3, place du Maréchal de Lattre de Tassigny, 75775 Paris cedex 16.
E-mail : imrinp@instndir.cea.fr

L'auteur tient à remercier le Professeur Alban Richard qui a dirigé la thèse dont ce papier constitue un résumé. La version finale du papier a été réalisée grâce aux remarques pertinentes et constructives des deux lecteurs de la revue. Qu'ils en soient remerciés très sincèrement. L'auteur reste cependant responsable des erreurs et imperfections qui pourraient subsister.

LA protection de l'environnement constitue aujourd'hui un enjeu majeur pour la société et il est fort probable que son importance s'amplifie dans les prochaines années.

Les agriculteurs, consommateurs d'engrais (et de pesticides) sont montrés du doigt car ils sont responsables d'une pollution diffuse atteignant rivières et nappes phréatiques.

Parallèlement, ces agriculteurs sont confrontés à des difficultés économiques liées à la baisse régulière du prix des produits agricoles dans la Communauté européenne. Ils tendent donc à limiter leur coût de production en maîtrisant mieux leurs consommations intermédiaires dont les engrais constituent une part importante.

Compte tenu de ces enjeux économiques et environnementaux, quelle sera dans quinze ans, en France, la consommation d'engrais ?

L'objectif de cet article est d'apporter une réponse à cette question en distinguant différents scénarios d'évolution du contexte économique, politique et technologique. La future Politique agricole commune (PAC) est sans doute le facteur le plus déterminant pour cette évolution.

Ne sont considérés ici que les engrais azotés, principaux responsables de la pollution des nappes phréatiques⁽¹⁾ et dont l'emploi, indispensable au maintien d'un niveau de rendement rentable, peut être raisonné. Cependant, la méthodologie employée pour estimer leur consommation future se veut aisément généralisable à d'autres intrants (engrais potassiques ou phosphoriques, phytosanitaires, semences, énergie...).

L'objectif de cette recherche est donc double :

D'une part, il s'agit de construire un modèle prospectif représentant le secteur agricole et l'industrie des engrais, afin d'estimer (par simulations) la consommation d'engrais en 2010. L'exercice est difficile car, si la prospective d'entreprise dispose d'une méthodologie approuvée avec toute une panoplie d'outils appropriés (Godet, 1985 et 1991a ; Hatem *et al.*, 1993 ; Lesourne et Stoffaës, 1997), la prospective globale, qui considère un secteur entier de l'économie, souffre d'un grand vide méthodologique⁽²⁾. Au début des

⁽¹⁾ Une opération de lutte contre les pollutions diffuses par les nitrates, l'opération « Ferti-Mieux », a été lancée en 1991 par le ministère de l'Agriculture et le ministère de l'Environnement. Cette opération s'appuie sur les travaux du Comité interministériel de réflexion pour la lutte contre les pollutions par les nitrates, les phosphates et les pesticides (voir en particulier CORPEN, 1987).

⁽²⁾ Voir J. Lesourne, 1989 et P. Gonod, 1990 qui écrit : « Autant les exercices prospectifs sont enrichissants au niveau des entreprises, autant leur intérêt est discutable quand il s'agit de la macro-économie, de la perception des alternatives d'évolutions de grands secteurs, de groupes sociaux, de pays, de régions ».

Dans cet article, nous appelons *prospective globale* l'exercice qui consiste à prévoir les alternatives d'évolution de grands secteurs, de groupes sociaux, de pays, de régions. La prospective globale correspond à ce qu'Yves Barel (1973) nomme prospective sociale, qui se veut globale (*i.e.* tributaire des théories des diverses disciplines) et systémique (*i.e.* relevant de l'analyse des systèmes).

années 70 pourant, Yves Barel a exposé les bases conceptuelles de l'analyse systémique et de la prospective globale (Barel, 1971 et 1973). Leur transformation en une méthodologie prospective opérationnelle restait à faire et elle ne l'a pas été. Sans avoir la prétention de réaliser cette « transformation » (travail long et difficile auquel participe actuellement Pierre Gonod (1996) et la Direction de la collection « *Travaux et Recherches de Prospective* »⁽³⁾), nous proposons une méthode de prospective globale.

Cette méthode qui s'appuie sur les réflexions d'Yves Barel et sur la systémique⁽⁴⁾ fait interagir modélisation, expertises et simulations. Appliquée au secteur agricole et à l'industrie des engrais azotés, elle est transférable à d'autres secteurs.

D'autre part, au-delà de cet apport méthodologique conduisant à des résultats ponctuels, l'objectif de cette étude est de donner une vision prospective globale de l'agriculture française en 2010⁽⁵⁾.

Nous avons procédé en trois étapes :

- La première consiste à donner une représentation du système « engrais azotés : offre et demande » (liste des variables clés et définition de leurs liens) avec un accent particulier sur le sous-système « secteur agricole français : demande d'engrais ».
- La deuxième décrit la méthodologie d'étude. Elle comprend la modélisation du système et la construction des scénarios d'évolution pour projeter le modèle.

Le modèle est constitué d'un modèle représentatif du secteur agricole français (AROPAJ) et de modèles périphériques :

- AROPAJ est un modèle représentatif du secteur agricole français, mis au point à l'INRA⁽⁶⁾ pour étudier les répercussions à court terme⁽⁷⁾ de la PAC sur le secteur agricole français,
- les modèles périphériques viennent se greffer autour du modèle AROPAJ pour en faire évoluer la structure et l'adapter au long terme⁽⁸⁾.

⁽³⁾ Cette collection est publiée par *Futuribles international* en collaboration avec le LIPS (Laboratoire d'investigation prospective et stratégique) du Conservatoire national des arts et métiers et la DATAR (Délégation à l'aménagement du territoire et à l'action régionale). Elle a pour objectif d'assurer la diffusion d'études et de recherches prospectives qui, en raison de leur apport conceptuel et méthodologique, sont de nature à contribuer au développement de la prospective.

⁽⁴⁾ Voir Forrester (1961) pour son utilisation de la Dynamique des systèmes en prospective sociale. Voir aussi Le Moigne (1977, 1990) pour l'analyse des systèmes et la modélisation (systémique) ainsi que Walliser, 1977.

⁽⁵⁾ D'autres études prospectives concernant le secteur agricole français ont été réalisées. Voir notamment : Boussard, 1991 ; Le Roy, 1994 ; Tirel, 1991 ; Neveu, 1992 ; Kayser, 1992 et, plus récemment, Sebillotte, 1996.

⁽⁶⁾ L'auteur d'AROPAJ est Pierre-Alain Jayet. Qu'il soit remercié pour le transfert de son modèle ainsi que pour ses conseils (Jayet, 1990).

⁽⁷⁾ i.e. moins de 5 ans.

⁽⁸⁾ i.e. en 2010.

La construction des scénarios permettant de projeter le modèle en 2010 est basée sur des enquêtes d'experts⁽⁹⁾. Trois enquêtes ont ainsi été réalisées :

- la première (de type *brainstorming*) concerne le secteur des engrais azotés,
- la deuxième (Delphi) porte sur l'innovation technologique consistant à créer des céréales fixatrices d'azote atmosphérique,
- et la troisième (Delphi) traite de l'évolution de la PAC et de ses conséquences sur l'avenir de l'agriculture française.

• Enfin, la dernière étape présente l'ensemble des sorties de l'étude : scénarios d'experts et simulations effectuées sur le modèle. Ces simulations permettent d'estimer, suivant les différents scénarios, la consommation d'engrais azotés en 2010.

DÉFINITION DU SYSTEME ÉTUDIÉ

Le système « engrais azotés : offre et demande » peut être décomposé en deux sous-systèmes principaux : le « secteur agricole français » qui implique une demande d'engrais et « l'industrie des engrais » qui y répond. Comme la demande d'engrais azotés est l'objet principal de l'étude, l'accent est mis sur le « secteur agricole français » aux dépens de « l'industrie des engrais » qui ne joue en fait que sur le prix des engrais et sur leurs caractéristiques techniques.

Après la représentation schématique du système global montrant comment s'articulent les sous-systèmes considérés, est défini en détail le sous-système « secteur agricole » sur lequel s'appuie l'analyse prospective.

Représentation schématique (cf. schéma n° 1)

La représentation du système global met en scène deux grands marchés (offre et demande) : celui des engrais et celui des produits agricoles.

Le marché des engrais azotés :

• L'offre

L'offre d'engrais azotés, constituée par la production locale et étrangère, n'est pas limitée. Les produits mis sur le marché ont des compositions et des conditionnements diversifiés.

La variable à retenir pour cette étude prospective est le prix auquel les agriculteurs français achètent leurs engrais. Il est en grande partie lié au prix des consommations intermédiaires intervenant dans la fabrication des engrais. La principale matière première est le gaz naturel qui permet de synthétiser l'ammoniac dont la plupart des engrais azotés chimiques sont issus.

⁽⁹⁾ Les méthodes de prévision quantitatives ne sont pas adaptées au long terme (Godet, 1991b). Voir Jantsch, 1967 ; Saint-Paul et Ténier-Buchot, 1974 ; Zitt, 1979 et Godet, 1985 pour une présentation des méthodes de prévision qualitatives.

- *La demande*

Du côté de la demande française d'engrais azotés, les acteurs principaux sont les agriculteurs qui, par le choix de leur assolement et de leur mode de production (plus ou moins intensif, recours ou non aux engrais naturels issus de l'élevage), influent sur la consommation totale. Pour un mode de production donné, le choix de l'assolement dépend du prix des produits agricoles, eux-mêmes variables selon les débouchés sur le marché.

Le marché des produits agricoles⁽¹⁰⁾ :

- *L'offre*

L'ensemble des agriculteurs conditionne l'offre de produits végétaux et animaux. L'accent est mis sur la production végétale car c'est elle qui implique une consommation d'engrais, étant entendu qu'elle est utilisée en grande partie pour l'alimentation des animaux⁽¹¹⁾.

Notons que l'élevage induit des rejets azotés (engrais naturels) pouvant être substitués aux engrais chimiques.

- *La demande*

La demande de produits végétaux ou animaux constitue aussi un élément important du système.

Elle résulte de la demande locale et des exportations dont le niveau est lié à la compétitivité des produits nationaux sur le marché mondial. Cette compétitivité influe aussi sur les importations de produits agricoles venant concurrencer la production locale.

Il est nécessaire de considérer l'utilisation non alimentaire des produits végétaux, faible aujourd'hui, mais qui pourrait prendre de l'importance dans l'avenir.

Les facteurs d'évolution

Les principaux facteurs d'évolution à considérer dans ce système sont :

- *les prix* qui résultent des caractéristiques des marchés, mais dépendent aussi, à plus ou moins long terme, du jeu de certains acteurs (mesures politiques en particulier).

- *les facteurs structurels :*

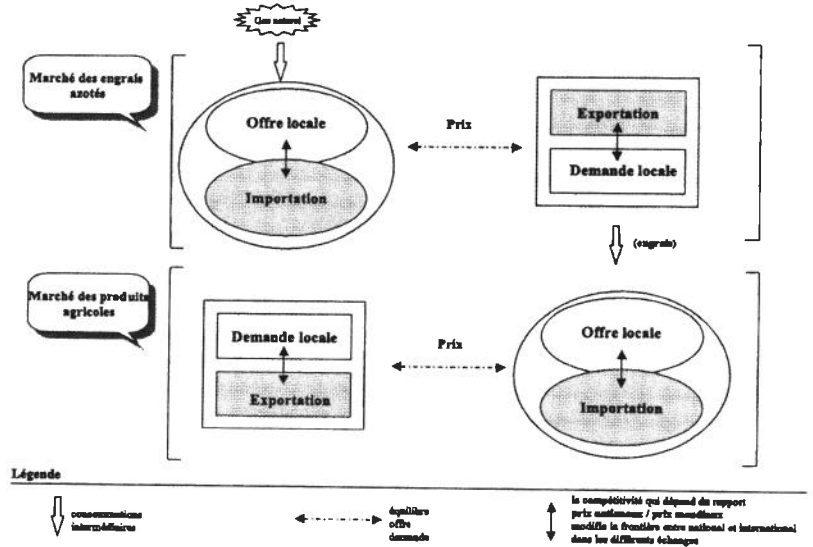
- pour l'industrie des engrais azotés : la fonction de production de l'ammoniac. Elle peut varier avec les progrès technologiques et donc influencer sur le prix des engrais (en raison de la variation du coût de production),

⁽¹⁰⁾ Pour les statistiques sur le marché des produits agricoles (offre et demande), cf. Taverdet-Popiolek, 1997.

⁽¹¹⁾ A titre d'exemple, sur 15 millions de tonnes de protéines végétales produites par an en France (campagne 1991-1992), seulement 0,8 sont destinées à l'alimentation humaine. Le reste est utilisé pour l'alimentation des animaux et sera donc transformé en protéines animales pour l'alimentation humaine (1,65 millions de tonnes de protéines animales sont ainsi produites). Ces données tiennent compte des exportations et des importations de protéines végétales et animales (*Source* : Guy Fauconneau et Yves Dronne, Étude statistique sur la « filière protéines » réalisée pour la Délégation à l'agriculture, au développement et à la prospective – DADP, cf. Taverdet-Popiolek, 1997).

- pour le secteur agricole : la démographie (évolution du nombre d'exploitations et de leur taille), le mode de production (consommation unitaire d'élément azoté d'origine chimique).

Schéma 1.
Représentation
schématique du
système étudié



Dans ce schéma, ↓ (engrais) représente le lien entre le marché des engrais azotés et celui des produits agricoles.

Analyse détaillée du sous-système « secteur agricole français » : demande d'engrais et offre agricole (cf. schéma n° 2)

Comme on vient de le mentionner, un des facteurs structurels importants du secteur agricole est la démographie (nombre d'exploitations et taille). Elle est conditionnée par des variables socio-économiques (pyramide des âges, population active totale, etc.) et par des variables dites de commande comme la PAC et la politique d'environnement. Certaines mesures politiques peuvent, en effet, inciter les agriculteurs à s'installer, à s'agrandir ou au contraire à cesser leur activité agricole.

Le mode de production (plus ou moins intensif) est une variable essentielle pour l'étude qui est menée ici, car il se traduit par une fertilisation unitaire moyenne par hectare et par culture (cf. encadré n° 1). Il est influencé par les variables de commandes politiques (va-t-on favoriser l'extensification ?), le prix des inputs (si les engrais sont plus chers, on en met moins), la taille des exploitations ⁽¹²⁾ et l'innovation technologique en agriculture (amélioration

⁽¹²⁾ Depuis le XIX^e siècle, de nombreux écrits ont étudié l'existence d'une relation entre taille et intensification. Dans cette étude prospective, nous étudierons l'évolution de cette relation en interrogeant des experts. Ces derniers auront à se prononcer sur la valeur de certains paramètres reflétant le mode de production (quantité d'engrais épandus par hectare, rendements...) en fonction de la taille des exploitations (cf. encadré n° 6). En raison de l'évolution attendue dans la manière dont l'agriculteur détermine la dose d'azote (amélioration de l'information disponible – cf. encadré n° 1), il n'est pas évident que la relation entre taille et intensification soit aussi nette que dans le passé. Il se pourrait même qu'elle soit inversée.

des rendements, évolution du comportement des agriculteurs en matière de fertilisation...).

Encadré n° 1. Le mode de production

Quelles sont les modalités de fixation des doses d'azotes ? Comment doivent-elles évoluer ?

Dans la logique productiviste, l'agriculteur va chercher à minimiser les risques (*i.e.* variations interannuelles du rendement et de la qualité) en majorant les doses de fertilisants. Si, par chance, l'année climatique autorise des rendements très élevés, il est sûr que l'apport en engrais est suffisant. En revanche, chaque fois que le rendement n'atteint pas les sommets espérés, une partie de l'engrais reste inutilisée par la plante, ce qui augmente les risques de pollution.

Du point de vue strictement économique (sans considérer les externalités négatives sur l'environnement), cette stratégie est cohérente car le surcoût lié à une fumure excessive est faible devant la perte encourue en cas de fumure insuffisante. Avec cette stratégie d'«assurance», les agriculteurs minimisent, sur plusieurs années, les risques de sous-fertilisation.

Toutefois, des agronomes ont montré (cf. en particulier Meynard, 1985) qu'il pouvait être plus intéressant de viser des niveaux de rendement un peu plus faibles et de diminuer simultanément l'apport d'azote et de fongicides : dans un certain nombre de cas, la marge brute de ces cultures raisonnées est plus élevée que celle des cultures intensives et la variabilité des rendements n'est pas accrue par les réductions d'intrants. Il suffit de suivre le bon itinéraire technique⁽¹³⁾ permettant de réduire l'apport d'intrants de manière cohérente, en limitant les risques.

Si, pour les cultures simples, on dispose d'itinéraires techniques répondant à des objectifs de rendement variés⁽¹⁴⁾, des progrès restent à faire pour les systèmes de culture plus complexes (cultures successives) ou pour les systèmes d'élevage.

A fortiori, lorsque l'on sort d'un strict objectif productiviste pour prendre en compte les risques environnementaux, la construction des itinéraires techniques est beaucoup plus délicate. Pourtant, il convient de s'orienter vers une agriculture reproductible qui réponde au triple objectif - rentabilité, respect de l'environnement et qualité des produits agricoles.

Dans ce cadre, la mise en place de systèmes techniques nécessite de gérer un ensemble de risques qu'il faut prendre en considération simultanément (Allain et Sebillotte, 1991). Au-delà de ces progrès agronomiques, technico-économiques, il est nécessaire de réfléchir aussi à l'application de tels systèmes dans les exploitations agricoles (dont la diversité implique des adaptations sur mesure).

Deux voies de recherche, non exclusives, vont dans ce sens (cf. Meynard et Girardin, 1991) :

- la recherche d'une réduction des risques en jouant sur l'ensemble du système de culture dont il faut maîtriser les interrelations (aide à la décision au niveau stratégique) : modélisation du fonctionnement de l'exploitation en vue de choisir les meilleures successions culturales et les itinéraires techniques adaptés.
- la recherche d'indicateurs permettant d'adapter au jour le jour les décisions à l'état de la culture (aide à la décision au niveau tactique) : ajustement précis de la date ou des modalités d'une décision technique⁽¹⁵⁾.

Par exemple, le développement d'indicateurs de pilotage des cultures (kit de diagnostic, carte informatisée...) devrait permettre une adaptation plus fine des apports d'engrais aux besoins (cf. Van den Bossche, 1990 et Montalescot, 1992)⁽¹⁶⁾. De même, une meilleure information sur les bilans de fumure permet d'évaluer *a posteriori* les décisions pour faire évoluer les pratiques d'une année sur l'autre.

L'évolution du comportement des agriculteurs est tributaire de l'évolution des outils permettant de mieux adapter la fertilisation à un objectif de production donné, en quantité et en qualité. Ces outils ne doivent pas être imposés aux agriculteurs mais élaborés avec eux. La modification du mode de production résulte d'un dialogue entre chercheurs et acteurs, sur les mécanismes de décision, le risque et l'incertitude (cf. Attonaty *et al.*, 1989).

⁽¹³⁾ « Un itinéraire technique est une combinaison logique et ordonnée de techniques culturales utilisées sur une parcelle, qui permet, par le contrôle du milieu écologique, d'atteindre un objectif de production donné, en quantité et en qualité. », Sebillotte, 1996, p. 138. (Voir également Meynard, 1985 ; Sebillotte, 1978 et 1991).

⁽¹⁴⁾ cf. INRA, 1992, pp. 128-136.

⁽¹⁵⁾ Cela suppose un changement dans l'équilibre des temps de travaux : moins de temps passé sur le tracteur plus de temps de vigilance.

⁽¹⁶⁾ Cf. en particulier Bonny et Carles, 1993, article dans lequel sont décrites les voies possibles pour une limitation des consommations d'engrais et de pesticides.

A chaque fonction de production (végétale), on associe une fertilisation moyenne par hectare et par culture. La demande d'engrais dépend à la fois de la démographie agricole (surfaces cultivées) et du mode de production (fertilisation par hectare).

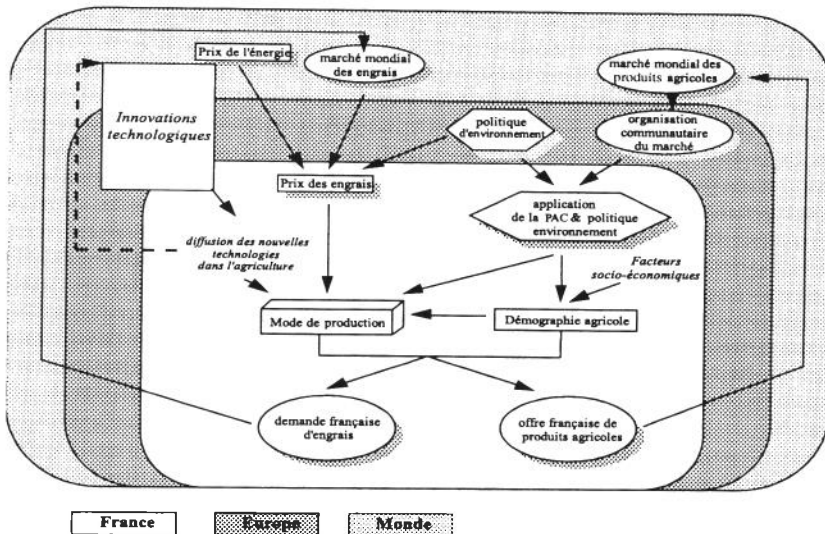
Les variables d'environnement (*i.e.* externes) de ce sous-système se situent au niveau européen ou mondial. Elles comprennent :

- le marché mondial des produits agricoles (débouchés) qui conditionne l'organisation du marché européen, et par conséquent l'application de la PAC en France ; il est lui-même influencé par la production française (rétroaction) car celle-ci est suffisamment importante pour avoir un poids non négligeable au niveau mondial,
- les politiques européennes de protection de l'environnement qui dictent les mesures françaises,
- le prix de l'énergie et le marché mondial des engrais qui jouent sur le prix des engrais en France. Ce marché mondial est influencé par la demande française d'engrais (rétroaction).

Enfin l'innovation technologique au niveau mondial a une influence sur le système étudié. C'est un facteur endogène car il dépend de l'évolution du système : par exemple la nouvelle PAC aspire à un nouveau mode de production qui nécessite de nouvelles technologies (rétroaction).

Les autres sous-systèmes : quelles sont les variables à considérer ?

Schéma 2. Sous-système secteur agricole français: variables clés et leur influence (→)



Les variables internes au sous-système « secteur agricole français : demande d'engrais et offre agricole » sont situées à l'intérieur du cadre blanc. Les autres sont des variables d'environnement se situant au niveau européen ou mondial (cadres gris).

Les variables figurent en gras ci-dessous.

L'industrie française des engrais azotés, en amont

- *Offre d'engrais azotés*

L'étude de ce secteur est nécessaire pour prévoir l'évolution du **prix des engrais** compte tenu des **coûts de production** (**coûts des matières premières** notamment) et de la concurrence internationale.

Elle permet en outre de faire des pronostics sur les **caractéristiques techniques** des futurs engrais mis sur le marché (conditionnement, composition).

La demande de produits végétaux, en aval

On distingue :

- *La demande alimentaire*

La demande de produits végétaux destinée à l'alimentation (humaine ou animale) est considérée au niveau mondial. Sont distingués les *pays tiers* où la **démographie** joue un rôle primordial, les *pays de l'Est* dont l'indépendance alimentaire dépend de la stabilité politique et les *pays de l'OCDE* pour lesquels les exigences en terme de qualité sont primordiales (**proportion viandes/végétaux**)⁽¹⁷⁾.

- *La demande non alimentaire*

La future utilisation des produits agricoles à des fins non alimentaires dépend de sa **rentabilité économique** liée en partie à l'évolution des **procédés techniques** et aux avantages accordés (PAC).

MÉTHODOLOGIE D'ÉTUDE

Modélisation du système « engrais azotés » : un modèle central et des périphériques

Nous avons accordé une place centrale au sous-système « secteur agricole français » en mettant particulièrement l'accent sur la variable **demande d'engrais**. Les autres sous-systèmes n'ont pas fait l'objet d'une modélisation aussi poussée et constituent, avec les variables d'environnement décrites précédemment, des modèles périphériques se rattachant au modèle central par des paramètres communs ou des relations d'influence.

⁽¹⁷⁾ Pour les statistiques concernant la demande alimentaire (proportion viandes/végétaux), cf. Taverdet-Popiolek, 1997.

La consommation d'engrais d'une exploitation agricole

Au niveau de la France entière, la demande d'engrais résulte de la somme des consommations individuelles de chacune des exploitations agricoles. L'approche consistant à estimer ces consommations individuelles diffère selon que l'on se place à court terme ou à long terme⁽¹⁸⁾.

Encadré n° 2. La consommation d'engrais à court terme

Dans une exploitation agricole, on distingue les extrants (produits végétaux destinés à la vente ou à l'alimentation des animaux), les intrants (engrais, produits phytosanitaires, semences) et les facteurs de production : terre, capital (bâtiment, matériel) et travail (UTA).

A court terme, ces facteurs de production sont fixes car l'acquisition de terre, de capital ou de main-d'œuvre ne se fait pas très souvent. Il en est de même pour les consommations unitaires d'intrants qui reflètent un mode de production relativement rigide (forte inertie du comportement des agriculteurs). Par conséquent, pour améliorer sa marge brute, l'agriculteur ne peut jouer que sur le choix des spéculations (nombre d'hectares consacrés à chaque culture) nécessitant des consommations unitaires d'inputs diversifiées. Cette maximisation, dont les paramètres sont les prix des produits végétaux et des inputs, est contrainte par la disponibilité en facteurs fixes mais aussi par des contraintes de nature agronomique (rotations culturales, milieu).

Le système de contraintes et le mode de production (consommation unitaire moyenne⁽¹⁹⁾ d'inputs) dépend à la fois du type d'exploitation considéré et de sa localisation géographique. Par type d'exploitation on entend la spécialité culturale (exploitation à dominance de grandes cultures ou bien spécialisée dans l'élevage extensif) mais aussi la taille économique, c'est-à-dire l'importance des ressources en facteurs fixes. La localisation géographique joue sur la structure des contraintes agronomiques (type de sol, climat) et sur le mode de production puisqu'il existe des traditions culturelles régionales (histoire, proximité de certaines IAA, climat, etc.)⁽²⁰⁾.

En France, la diversité des exploitations complique la typologie, généralement fondée sur la classification utilisée au Service central des études et enquêtes statistiques (SCEES) consistant à différencier les exploitations en fonction de leur Orientation-technico-économique (OTEX). Cette classification est souvent croisée avec un découpage régional.

Une fois défini le croisement OTEX-Région, la demande d'engrais à court terme peut être estimée⁽²¹⁾ via un modèle de programmation linéaire qui associe à chaque type d'exploitation un système de maximisation sous contraintes.

⁽¹⁸⁾ Par opposition à court terme (moins de 5 ans), long terme signifie que l'horizon temporel est suffisamment éloigné pour laisser à l'agriculteur, le temps d'investir pour accroître son capital fixe : acquisition de nouvelles terres, de nouveaux bâtiments, etc. L'horizon long terme considéré pour l'étude est 2010.

⁽¹⁹⁾ Lorsque l'on raisonne au niveau de l'exploitation, on parle de consommations moyennes d'engrais à cause de la diversité des parcelles.

⁽²⁰⁾ Cette typologie est simplificatrice car, dans la réalité, chaque exploitation a des caractéristiques qui lui sont propres : unicité des contraintes agronomiques et des comportements techniques.

⁽²¹⁾ On parle d'estimations pour souligner le caractère approximatif de cette démarche qui repose sur un modèle simplifié de la réalité.

• *Estimation de la consommation d'engrais à court terme*

A court terme, le problème est relativement simple. Il suffit de faire l'hypothèse que le comportement du chef d'exploitation est rationnel pour ramener cette étude à un problème de maximisation d'une marge brute sous contraintes. La marge brute dépend du choix des spéculations (nombre d'hectares consacrés à chaque culture) et du mode de production (définissant en particulier la consommation unitaire d'engrais azoté), tandis que les contraintes dépendent des facteurs (terre, capital, travail) et de la fonction de production, fixes à court terme.

On considère autant de *maximisations* qu'il y a de types d'exploitations différents, chacun d'eux étant lié à sa spécialité culturale ainsi qu'à son appartenance régionale (cf. encadré n° 2).

• *Estimation de la consommation d'engrais à long terme*

A long terme, le problème est beaucoup plus délicat parce qu'un grand nombre de variables ne peuvent plus être considérées comme fixes. Au niveau national, le nombre total d'exploitations varie et le taux d'évolution diffère selon le type d'exploitation considéré. La typologie peut elle-même changer en raison notamment de l'apparition ou de la disparition d'une spécialité culturale dans une région donnée.

Cette évolution démographique se traduit par des transferts de terres, les exploitations restantes profitant des départs pour s'agrandir. Au niveau de l'exploitation, on ne peut donc plus considérer que la terre soit un facteur fixe et l'agriculteur évalue ses possibilités d'agrandissement pour optimiser à long terme son profit. Il en est de même pour les autres facteurs de production comme le travail et le capital. Le mode de production est alors modifié lui aussi.

La construction du modèle prospectif ci-dessous tient compte de l'évolution à long terme de toutes ces variables, supposées fixes à court terme.

Le modèle prospectif

Notre choix méthodologique a consisté à utiliser le modèle AROPAJ (cf. encadré n° 3) pour représenter le secteur agricole français⁽²²⁾.

⁽²²⁾ Au moment où nous avons entrepris cette recherche, d'autres modèles représentatifs du secteur agricole français existaient à l'INRA (MAALT, MISS) ou au ministère de l'Agriculture (MAGALI), mais il s'agissait de modèles *économétriques* difficilement projetables dans le long terme (voir en particulier Mahé *et al.*, 1983 ; Albecker et Lefebvre, 1985).

Encadré n° 3. Le modèle central représentatif du secteur agricole français

Le secteur agricole français a été représenté à l'aide du modèle d'offre agricole AROPAJ⁽²³⁾ et adapté aux besoins de l'étude. Il s'agit d'un modèle de programmation linéaire destiné à étudier les répercussions des nouvelles mesures de la PAC sur le secteur agricole français : niveau de l'offre, revenu des agriculteurs et budget du FEOGA. Il considère 38 types d'exploitations relativement homogènes différenciés en fonction des régions (13 régions en tout) et des OTEX (OTEX 11 – Céréales, 12 – Céréales et Grandes cultures, 1 – Grandes cultures, 3 – Cultures permanentes, 4 – Herbivores, 5 – Granivores, 6 – Polyculture, 7 – Poly-élevage, 8 – Culture-élevage).

AROPAJ considère les cultures suivantes : blé tendre et blé dur, orge de printemps et orge d'hiver, maïs, pomme de terre, betterave sucrière, prairie temporaire, tournesol, colza, légume sec, betterave fourragère, prairies permanentes. Pour chacun des 38 groupes, est défini un système d'optimisation linéaire (maximisation du profit attendu de l'agriculteur) caractérisé par des paramètres estimés économétriquement.

Parmi ces paramètres, nous avons dégagé ceux qui, de près ou de loin, influent sur la demande d'engrais. Certains ont dû être décomposés (la charge variable par culture et par groupe a été désagrégée en charge engrais et charge hors engrais), d'autres ajoutés (taxe sur engrais et quotas sur engrais) pour pouvoir tester l'effet d'une politique d'environnement.

Les paramètres du modèle AROPAJ retenus pour l'étude correspondent aux variables clés du sous-système « secteur agricole » définies dans la première partie :

Mesures de Politique agricole commune

- Taxe de corresponsabilité/culture
- Prix intérieur/culture et prix alimentation animale
- Surface minimale à geler, prime au gel/groupe
- Quota de production agricole/culture et/groupe

Mesures de production

- Effectif animal/groupe
- Quantité d'engrais/culture et/groupe
- % N, % P, % K/culture
- Rendement/culture/groupe
- Prix des engrais NPK
- Charge engrais/culture et/groupe
- Charge hors engrais/culture et/groupe

Mesures d'environnement

- Taxe sur les engrais (N, P ou K)
- Quota sur les engrais azotés/groupe

Démographie

- Effectif de chaque groupe
- SAU moyenne par groupe

Grâce à la programmation linéaire, AROPAJ permet de déterminer la demande d'engrais de chaque type d'agriculteur par maximisation de sa marge brute attendue (arbitrage entre des spéculations à consommation d'engrais diversifiée). Dans ce modèle, destiné à des prévisions de court terme (moins de cinq ans), les paramètres et les contraintes des programmes linéaires sont fixes, ainsi que la typologie des agriculteurs et le nombre d'agriculteurs par type d'exploitation.

⁽²³⁾ Le modèle AROPAJ que nous avons utilisé (version antérieure à 1992) était principalement axé sur la production végétale en France (Jayer, 1990 ; Jayet et Taverdet, 1991). Il s'agissait de la première version du modèle. Depuis, le champ couvert par AROPAJ s'est agrandi. Ce dernier prend désormais en compte l'offre animale (Mathurin, 1992) et considère davantage de groupes d'agriculteurs (19 régions, 82 groupes et 691 sous-groupes). La nouvelle version du modèle français s'appelle AROPAJ2 (Jayer, 1993, 1994, 1996a). Elle est utilisée actuellement pour évaluer les impacts d'une incitation communautaire au reboisement (Jayer, Binfet, Hofstetter, 1996b). Notons que des modèles comparables ont été élaborés pour la Grande-Bretagne et l'Italie.

Encadré n° 4. Description sommaire des modèles périphériques élaborés ⁽²⁴⁾

Prix des engrais azotés

Mesure de l'impact, à long terme, d'un renchérissement du gaz naturel sur le prix des engrais azotés à partir du coût réel de production prenant en compte l'amortissement du capital.

Pour cela, la fonction de production de l'industrie chimique des engrais azotés est étudiée en détail (à partir de données techniques et financières sur la fabrication des différents engrais azotés – PEP Year Book International 1988). On démontre, qu'à long terme, cet impact est négligeable.

Fertilisation

Quantité : Estimations économétriques sur la période 1970-1990 des élasticités à long terme : consommation unitaire d'engrais par rapport au prix des produits agricoles et par rapport aux prix des engrais (*sources* : SNIE et Indices des prix de l'INSEE).

Qualité : Dans 100 grammes d'engrais épandus (NPK), quelle est, pour chaque culture, la part d'azote, de phosphore et de potasse (% N, % P, % K) ? Etude des séries passées pour mettre en évidence la tendance (*sources* : SNIE 1970-1990 et *Cultivar* n° 268, février 1990) puis élaboration de deux scénarios sur la qualité :

- 1 - prolongement de la tendance passée où l'azote progresse, en part relative, plus vite que le phosphore ou la potasse,
- 2 - rupture en raison d'une innovation technologique majeure (beaucoup moins d'azote par hectare).

Rendements

Etude des séries passées afin de mettre en évidence, pour les cultures du modèle AROPAJ, des tendances de rendements (*source* : Grignon data base, 1979-1990).

Charges hors engrais

Comparaison sur séries passées des charges en engrais et des charges hors engrais pour mettre en évidence une relation (*source* : INSEE 1970-1990). Cette relation est projetée à l'horizon 2010 suivant différents scénarios.

Démographie agricole

Etude du devenir des groupes d'exploitations agricoles considérés dans le modèle central (évolution des effectifs et des surfaces cultivées par OTEX et par région).

Cette étude est réalisée à partir d'une enquête menée au CNASEA auprès des agriculteurs dans 40 départements français (Valette, 1991). Au niveau national, les résultats sont comparés avec ceux du SCEES (Rattin, 1992).

Deux scénarios d'évolution sont envisagés : hypothèse haute (taux annuel d'évolution du nb. d'exploitations = - 2,2 % ; de la SAU moyenne = 1,9 % ; de la SAU totale = - 0,4 %) ou basse (taux annuel d'évolution du nb. d'exploitations = - 2,8 % ; de la SAU moyenne = 2,4 % ; de la SAU totale = - 0,5 %). Le prix des terres est un indicateur permettant de choisir l'une ou l'autre de ces deux hypothèses. Il est influencé par un grand nombre de variables considérées dans le système « secteur agricole » comme le démontre le modèle périphérique sur le prix des terres.

Prix des terres ⁽²⁵⁾

On démontre que la valeur d'une terre est la somme de deux composantes : la valeur actualisée des rentes futures et la valeur d'option correspondant à d'autres affectations ultérieures (reboisement, vente...), identifiées à des futurs possibles.

Les variables déterminantes pour l'évolution du prix des terres sont donc les directives de la PAC (aides directes, primes au reboisement...), les prix anticipés des produits agricoles, les coûts de production et les rendements.

En faisant varier, dans le cadre de scénarios cohérents, ces paramètres, on peut en déduire l'évolution du prix de la terre. Si celui-ci diminue, les exploitations vont avoir tendance à s'agrandir et le mode de production sera plus extensif (hypothèse basse du modèle sur la démographie agricole).

⁽²⁴⁾ Cf. Taverdet, 1993, ch. 6 et 7 pp. 99-160.

⁽²⁵⁾ Ce modèle périphérique a été élaboré en collaboration avec J. Cavailhès et A. Richard (Cavailhès *et al.*, 1996).

Or, à l'horizon 2010, la structure du secteur agricole sur laquelle s'appuie AROPAJ va évoluer, sous l'influence notamment de la PAC et du progrès technologique. Nous avons donc élaboré des modèles périphériques qui viennent se greffer sur le modèle central de programmation linéaire pour permettre de projeter ses paramètres mais aussi pour pouvoir modifier sa structure (contraintes des programmes linéaires fixes à court terme, effectifs des exploitations agricoles...) (cf. encadré n° 4).

Le modèle prospectif (AROPAJ et périphériques) intègre ainsi toutes les variables du système global défini en début d'article.

Utilisation originale des outils de prospective pour projeter le modèle

L'outil principal utilisé pour projeter les paramètres du modèle AROPAJ en 2010 est l'enquête d'expert. Pour un grand nombre de ces paramètres, on demande aux experts de se prononcer sur leur évolution probable. Trois enquêtes ont ainsi été réalisées.

Les modèles périphériques ont alors un double rôle :

- ils permettent de vérifier la cohérence des scénarios⁽²⁶⁾ d'évolution proposés par les experts,
- ils donnent, sous les hypothèses explicites (et implicites) qui ont présidé à leur construction, les projections pour les paramètres non évoqués dans les enquêtes. Par exemple, si les experts se prononcent sur une évolution moyenne du *trend* des rendements, le modèle périphérique sur les rendements permet de décliner ce taux d'évolution suivant toutes les cultures du modèle AROPAJ.

Une enquête pour l'industrie des engrais

De nombreux entretiens sous forme de *brainstorming* avec les industriels (SNIE, Société Chimique de la Grande Paroisse, Hydro Azote, BASF) et avec des économistes spécialistes du domaine, ont permis de dresser un bilan du secteur des engrais azotés en France aujourd'hui et d'en entrevoir les perspectives d'évolution. L'objectif est de réunir les éléments nécessaires pour projeter le prix et les caractéristiques techniques des engrais.

⁽²⁶⁾ *i.e.* cohérence des scénarios avec la vision du monde qui est à l'origine de la conception des modèles.

Evolution du secteur agricole: deux enquêtes Delphi

Encadré n° 5. La méthode Delphi⁽²⁷⁾

C'est une méthode qui permet, en exploitant le jugement intuitif d'un groupe d'experts, de formuler des hypothèses sur la réalisation d'événements futurs. Des questionnaires successifs (itérations) sont envoyés par voie postale aux experts à qui il est demandé de répondre en tenant compte des résultats de l'itération précédente. L'objectif de cette méthode est de mettre en évidence des convergences d'opinions pour dégager d'éventuels consensus. Toutefois, il peut être intéressant de considérer aussi les opinions extrêmes (*i.e.* minoritaires) afin de définir des futurs (scénarios) contrastés.

Deux enquêtes Delphi concernant le secteur agricole ont été réalisées en 1992.

Dans la première, les experts (une quarantaine environ de renommée internationale⁽²⁸⁾) doivent se prononcer sur la date éventuelle de commercialisation de céréales capables de fixer biologiquement l'azote de l'air.

La seconde (une centaine d'experts⁽²⁹⁾) a pour sujet : « L'évolution de la PAC à l'horizon 2010 et ses conséquences sur l'avenir de l'agriculture française ». La première partie du questionnaire porte sur le marché mondial des produits agricoles en 2010, la deuxième sur l'évolution de la PAC compte tenu de l'avenir du marché, et la troisième, sur les conséquences de la nouvelle PAC sur le secteur agricole français (cf. encadré ci-dessous).

⁽²⁷⁾ Cf. Jantsch, 1967 ; Saint-Paul et Ténrière-Buchot, 1974 ou Zitt, 1979 pour une description détaillée de la méthode Delphi.

⁽²⁸⁾ Le nom des experts a été extrait de la base de données des CAB (*Commonwealth Agricultural Bureau*) sur le domaine de la fixation de l'azote. N'ont été retenus que les chercheurs ayant publié plus de trois articles durant la décennie 1980-1990. L'auteur tient à remercier Jean Dénarié pour l'aide qu'il a apportée dans la réalisation de cette enquête.

⁽²⁹⁾ Appartenant à des organismes très divers : INRA, école-université, industrie, CCE, ministère de l'Agriculture, ONIC, profession agricole (fédération internationale, syndicat, Crédit Agricole...), Plan, INSEE, ministère des Finances, Centre d'étude des relations internationales.

Encadré n° 6. Extraits de l'enquête Delphi sur la PAC ⁽³⁰⁾

I. Quel sera l'état du marché mondial des produits agricoles en 2010?

- quest. 1* : Valeur des exportations des pays de l'OCDE à destination des Pays en Voie de Développement (PVD) en 2010/valeur des exportations en 1990 ?
quest. 3 : Demande totale de viande en 2010/demande actuelle ?
quest. 4 : Demande totale de produits végétaux pour l'alimentation humaine en 2010/demande actuelle ?
quest. 10 : Part des échanges non alimentaires sur les échanges alimentaires en 2010 ?

II. Quelle Politique agricole commune en 2010?

- quest. 13* : D'après vous, les prix européens des produits agricoles en 2010 représenteront quel pourcentage des prix européens actuels (en monnaie constante) ?
quest. 14 : Selon vous en 2010, les aides au revenu pour les grandes exploitations représenteront, en moyenne, quel pourcentage de leur revenu agricole ?
quest. 15 : En 2010, les aides au revenu pour les petites exploitations représenteront, en moyenne, quel pourcentage de leur revenu agricole ?
quest. 21 : Rapport budget environnement pour 2006-2010 sur budget environnement prévu pour 1993-1997 ?

III. Quelles seront les conséquences des mesures de la PAC sur le secteur agricole français en 2010?

- quest. 32* : Part des exportations françaises dans les exportations mondiales en 2010 ?
quest. 36 : Taux annuel moyen d'évolution des livraisons de produits végétaux pendant la période 1990-2010 ?
quest. 37 : Taux annuel moyen d'évolution des livraisons de produits animaux pendant la période 1990-2010 ?
quest. 39 : Part des livraisons de céréales sur les livraisons végétales en 2010 ?
quest. 40 : Part des livraisons d'oléagineux sur l'ensemble des livraisons végétales en 2010 ?
quest. 41 : Part des livraisons de produits végétaux non alimentaires sur l'ensemble des livraisons végétales en 2010 ?
quest. 42 : D'après vous, combien y aura-t-il d'exploitations agricoles en 2010 ?
quest. 43 : Parmi ces exploitations, combien seront considérées comme grandes (i.e. supérieures à 20 ha équivalent céréales) ?
quest. 44 : Parmi ces exploitations, combien auront comme activité principale l'entretien des terres non cultivées ?
quest. 53 : Diminution entre 1990 et 2010 de la quantité moyenne d'élément fertilisant NPK d'origine chimique épandue en France dans les grandes exploitations ?
quest. 54 : Diminution entre 1990 et 2010 de la quantité moyenne d'élément fertilisant NPK d'origine chimique épandue en France dans les petites exploitations ?
quest. 55 : Taux annuel moyen de croissance des rendements dans les grandes exploitations pendant la période 1990-2010 ?
quest. 56 : Taux annuel moyen de croissance des rendements dans les petites exploitations pendant la période 1990-2010 ?
quest. 57 : Taux annuel moyen de croissance de la SAU moyenne dans les grandes exploitations pendant la période 1990-2010 ?
quest. 58 : Taux annuel moyen de croissance de la SAU moyenne dans les petites exploitations pendant la période 1990-2010 ?
quest. 74 : Part des terres arables dans la SAU totale en 2010 ?
quest. 75 : Part des céréales dans l'ensemble des terres arables en 2010 ?

⁽³⁰⁾ Cf. Taverdet, 1993b. La numérotation des questions est celle du questionnaire d'origine. Les valeurs de référence (1990) y sont toujours rappelées.

RÉSULTATS

Les résultats concernent les scénarios définis par les experts interrogés et les simulations réalisées sur le modèle.

Scénarios d'experts

Industrie des engrais

Il ressort des entretiens avec les spécialistes que l'industrie française devrait avoir beaucoup de mal à faire face à la concurrence étrangère parce que le prix auquel elle achète le gaz naturel n'est pas compétitif⁽³¹⁾. Ainsi, le mouvement de délocalisation des usines d'ammoniac vers les pays où le gaz est bon marché, amorcé depuis quelques années déjà, devrait se poursuivre. La France pourrait alors importer l'ammoniac, qui se transporte mieux que le gaz naturel, pour terminer la chaîne de fabrication des engrais azotés. Elle pourrait peut-être se spécialiser dans l'élaboration de produits finis « sophistiqués » apparentés à la chimie fine (notons que cette hypothèse n'est pas retenue par un grand nombre d'experts), dans le développement des services aux agriculteurs ou dans la mise au point d'équipements spécialisés.

Par ailleurs, aucune innovation technologique majeure n'est attendue au niveau des unités de productions. Les consommations unitaires de gaz naturel nécessaires pour fabriquer l'ammoniac sont déjà réduites au maximum depuis les deux chocs pétroliers et d'ici 2010, elles ne pourront plus diminuer de façon significative⁽³²⁾.

Compte tenu de l'évolution présumée du secteur (concurrence forte et coûts de production relativement stables), les experts n'envisagent pas d'augmentation du prix des engrais, sauf, bien entendu, si les Pouvoirs Publics instaurent une taxe pour protéger l'environnement.

Secteur agricole

Fixation de l'azote

Les résultats de l'enquête Delphi laissent à penser qu'en 2010, aucune rupture technologique de ce type n'est envisageable car les biologistes doivent encore surmonter un grand nombre de difficultés⁽³³⁾.

⁽³¹⁾ D'ici 2010 le problème risque de s'aggraver. En effet, la seule réserve de gaz naturel française (gisement de Lacq) touche à sa fin et, dans quelques années, la France sera entièrement dépendante des pays producteurs.

⁽³²⁾ De même, la substitution du gaz naturel par l'électricité pour synthétiser l'ammoniac (électrolyse de l'eau) ne semble pas du tout envisageable. Il faudrait pour cela une révolution majeure du nucléaire, impossible à l'horizon retenu.

⁽³³⁾ Cf. Taverdet, 1994 pour la publication des résultats.

Avenir de la PAC et ses conséquences sur le secteur agricole français

A l'issue de l'enquête sur la PAC, six scénarios ont été définis pour l'évolution du secteur agricole en France. Nous les détaillons au paragraphe suivant avec les résultats des simulations.

- Le premier, appelé scénario médian, est celui qui a été retenu par la majorité des experts. Il ne présente pas de véritables ruptures par rapport aux valeurs de 1992 et est largement influencé par les directives concernant la nouvelle PAC du Commissaire européen Mac Sharry ⁽³⁴⁾.

- Les autres scénarios, qualifiés de contrastés car retenus par une minorité d'experts, diffèrent principalement en fonction des réponses apportées à deux questions fondamentales pour l'avenir de l'agriculture française :

- Quelle sera la demande de produits agricoles sur le marché mondial ? ⁽³⁵⁾
- La France sera-t-elle compétitive sur ce marché ?

Pour un objectif de production donné, ces scénarios se distinguent aussi par leurs hypothèses concernant la répartition des exploitations sur le territoire français, les mesures dictées par la PAC (prix et soutiens aux exploitations en particulier), les mesures environnementales, les progrès technologiques ⁽³⁶⁾, etc.

Simulations : quelle consommation d'azote en 2010 ?

Des simulations sur le modèle ⁽³⁷⁾ représentant le secteur agricole français ont été effectuées dans le cadre des six scénarios issus du Delphi sur la PAC. Les grandes tendances concernant l'évolution du secteur des engrais (prix hors taxe des engrais notamment) constituent la toile de fond pour ces simulations.

Les résultats pour les différentes régions de France (consommation unitaire d'élément azote) figurent sur les cartes ci-dessous (n° 2 à 7) avec en préalable les consommations de 1990 correspondant au scénario de référence (cf. carte n° 1).

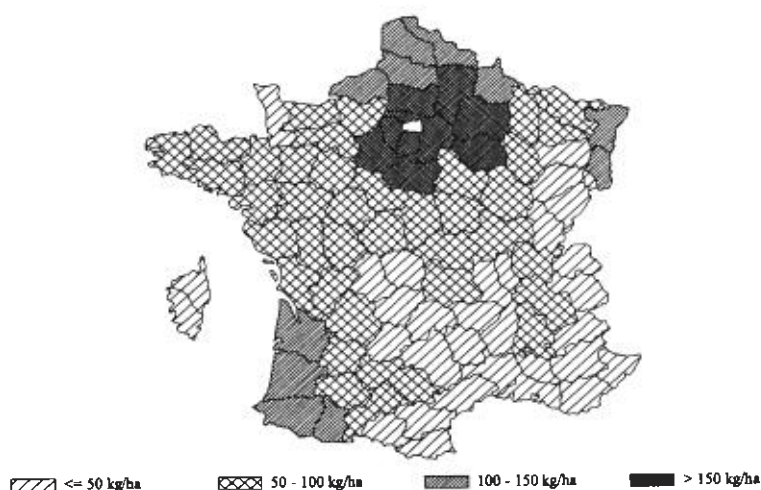
⁽³⁴⁾ Commission des Communautés européennes, 1991.

⁽³⁵⁾ Voir sur ce sujet Klatzmann, 1990, 1996.

⁽³⁶⁾ Au sujet des progrès technologiques en agriculture, voir en particulier, Byé *et al.*, 1989 ; Bonny, 1991, 1993.

⁽³⁷⁾ Les modèles périphériques permettent d'évaluer les paramètres ne figurant pas dans le Delphi. Pour ceux qui y sont évoqués, ils servent à définir une valeur cohérente à l'intérieure de la fourchette proposée par les experts.

Carte n° 1.
Consommation unitaire
d'azote (kg N/ha)
Scénario de référence
(1990)



Comme grandes régions consommatrices, on reconnaît le Bassin parisien, les plaines du Nord, l'Alsace et le Sud-Ouest qui sont des régions à dominance de grandes cultures. Les OTEX y sont principalement : Céréales, Céréales et Grandes Cultures, Grandes cultures et Herbivores. La consommation unitaire moyenne en France est de 90 kg/ha.

Simulations pour le scénario médian

Hypothèses retenues par la majorité des experts

En ce qui concerne les débouchés pour les produits agricoles, il n'y aurait pas beaucoup de changements si ce n'est une légère augmentation de la demande alimentaire des PVD (*quest. 1* : « de 105 % à 115 % ») et des pays de l'OCDE (*quest. 4* : « de 105 % à 115 % »). On peut s'attendre aussi à un faible accroissement des échanges non alimentaires (*quest. 10* : « de 20 % à 25 % »).

La PAC de 2010 serait très proche de la PAC de Mac Sharry :

- diminution des prix des produits agricoles de 30 % environ,
- soutien des revenus différencié selon la taille des exploitations (*quest. 14* : « de 10 % à 20 % », *quest. 15* : « de 30 % à 40 % »),
- maîtrise de l'offre agricole (gel des terres surtout),
- budget environnement un peu plus élevé que le budget prévu pour 1993-1997 (*quest. 21* : « de 115 % à 125 % ») avec priorité à l'extensification et à la conservation de la biodiversité.

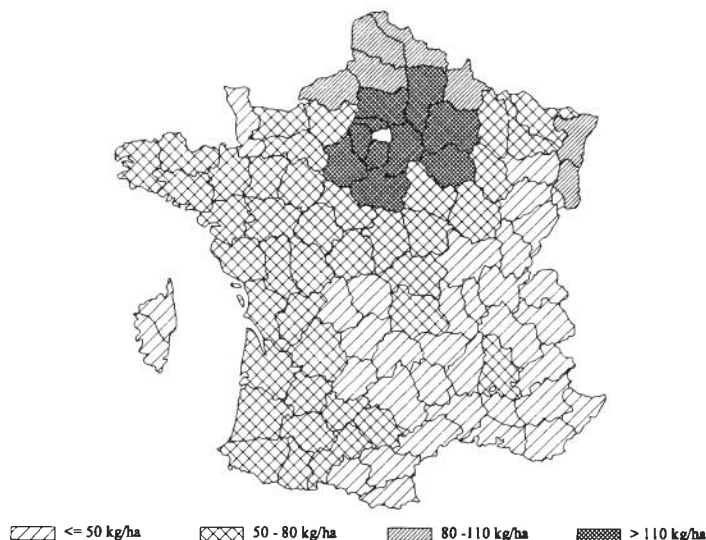
Une taxe de 20 % sur les engrais azotés serait vraisemblablement instaurée.

Sur le marché international, l'agriculture française serait un peu moins compétitive qu'aujourd'hui (*quest. 32*: « de 8 % à 9 % »).

La production de végétaux continuerait à croître mais moins rapidement que pendant la dernière décennie (*quest. 36*: « de 1 % à 2 % » par an). Elle comprendrait un peu moins de céréales (*quest. 39*: « de 25 % à 30 % ») et davantage de produits végétaux à usage non alimentaire (*quest. 41*: « de 5 % à 10 % »). La production de viande, quant à elle, resterait quasiment constante.

Environ la moitié des exploitations agricoles viendrait à disparaître d'ici 2010. Le mode de production deviendrait plus extensif: diminution de la consommation d'engrais chimiques par hectare (*quest. 53*: « de 5 % à 25 % » et *quest. 54*: « de 25 % à 35 % ») et augmentation importante de la taille des exploitations⁽³⁸⁾ (*quest. 57*: « de 2 % à 3 % » et *quest. 58*: « de 1 % à 2 % »).

Carte n° 2.
Consommation
unitaire
d'azote (kg N/ha)
en 2010 pour
le scénario médian



Dans ce contexte, pourtant, les rendements continueraient à croître (*quest. 55,56*: « de 1 % à 2 % » par an) en raison des progrès technologiques (en particulier, diffusion des organismes génétiquement modifiés), d'une meilleure efficacité de la fertilisation chimique (bonne adéquation des apports aux besoins grâce aux outils d'aide à la décision⁽³⁹⁾) et de

⁽³⁸⁾ Selon les experts, l'hypothèse, peut-être optimiste, de levée de certains blocages fonciers faciliterait, dans certaines zones, l'agrandissement des petites exploitations et les ferait participer au mouvement de restructuration important qui devrait se produire dans les 15-20 années à venir.

⁽³⁹⁾ Au niveau de la parcelle et/ou de l'exploitation.

l'utilisation d'engrais d'origine naturelle (animale ou végétale) ou de boues issues des stations d'épuration et de l'industrie⁽⁴⁰⁾.

Aucun changement notable n'est attendu pour la structure des OTEX ni pour les spécialisations régionales.

Enfin, la SAU perdrait entre 2 et 3 millions d'hectares avec une baisse de la proportion de terres arables (*quest. 74*: « de 50 % à 55 % »).

Commentaires :

La fertilisation unitaire moyenne diminue par rapport à la référence : 69 kg N/ha en 2010 contre 90 kg en 1990. Les régions les plus intensives sont sensiblement les mêmes, mise à part le Sud-Ouest qui voit sa fertilisation unitaire nettement diminuer. On note aussi une plus forte diminution pour la région formée des trois départements : Ain, Isère, Saône-et-Loire. Cela résulte d'une forte diminution de la consommation unitaire d'azote chez les agriculteurs pratiquant l'élevage (OTEX 4 – Herbivore et OTEX 7,8 – Poly-élevage, Culture-élevage), nombreux dans le Sud-Ouest ainsi que dans les trois départements cités. Ils utilisent des engrais d'origine naturelle et ont tendance à laisser des terres en friche.

Les régions de grandes cultures (OTEX Céréales et Grandes cultures) enregistrent une diminution moins sensible en raison de l'augmentation des rendements : une grande partie de la SAU est consacrée aux cultures de vente dont la consommation d'engrais est forte.

Simulations pour les scénarios contrastés

Scénario contrasté n° 1 : Forte augmentation de la demande alimentaire sur le marché mondial et compétitivité de la France stable

La demande de produits agricoles sur le marché mondial augmenterait considérablement en raison notamment de l'accroissement des besoins alimentaires des PVD (*quest. 1*: « plus de 135 % »). Viendraient s'ajouter aussi les exportations vers les Pays de l'Est. Face à cette demande alimentaire, le développement des produits agricoles non alimentaires serait d'ailleurs compromis (*quest. 10*: « de 15 % à 20 % »).

Dans ce contexte, les prix européens des produits agricoles seraient élevés (*quest. 13*: « de 85 % à 95 % ») et les aides aux revenus modérées (*quest. 14*: « de 10 % à 20 % », *quest. 15*: « de 20 % à 30 % »).

⁽⁴⁰⁾ Il semble que l'utilisation des boues se développe mais elle pose des problèmes, notamment celui de la connaissance de leur composition et le risque de présence de métaux lourds (Bonny et Carles, 1993).

Concurrencée par les autres pays exportateurs, la France n'augmenterait pas ses parts de marché (*quest. 32*: « de 9 % à 10 % ») mais, la demande extérieure étant plus forte qu'aujourd'hui, elle produirait davantage (*quest. 36,37*: « de 1 % à 2 % » par an).

Un tiers des exploitations agricoles disparaîtraient en France⁽⁴¹⁾. La majorité seraient petites, à temps partiel, chargées avant tout de *protéger l'environnement* en pratiquant une agriculture extensive, en entretenant les terres gelées ou en confectionnant des aliments *labélisés* à forte valeur ajoutée.

La production agricole serait assurée par de très grandes exploitations, peu nombreuses (*quest. 43*: *moins de 30 %* ») ayant, pour la plupart, adopté le système intégré et obtenant des rendements plus élevés qu'aujourd'hui (*quest. 55*: « de 1 % à 2 % » par an) avec moins de fertilisants (*quest. 53*: « de 5 % à 25 % »). Ces exploitations seraient sans doute très spécialisées.

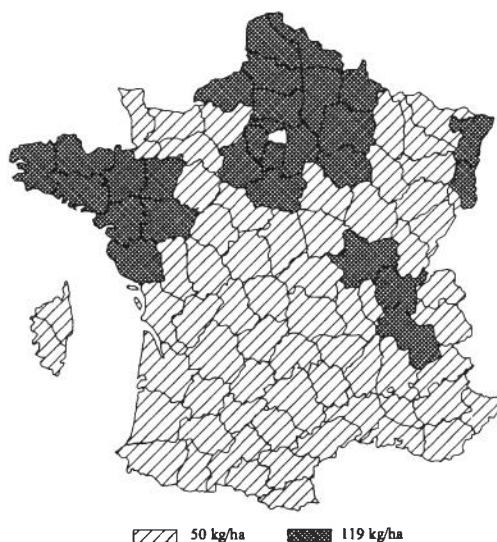
Enfin la SAU perdrait entre 3 et 4 millions d'hectares et la proportion de terres arables diminuerait (*quest. 74*: « de 50 % à 55 % »).

Pour traduire avec AROPAJ cette hypothèse d'agriculture à deux vitesses, nous avons effectué un découpage régional inspiré d'une étude réalisée par André Neveu, 1992. D'après cet expert, le niveau d'intensification des entreprises agricoles devrait être, plus strictement que par le passé, adapté aux conditions de production de chaque région, c'est-à-dire au potentiel agro-climatique et à l'environnement agro-industriel. Ainsi, les terres les plus riches et les mieux pourvues en industries agro-alimentaires (IAA) performantes supporteront les exploitations fortement productives. Il pourrait s'agir du Bassin parisien, région de grandes plaines céréalières à sol riche, où les rendements sont susceptibles d'augmenter fortement, la Bretagne et le grand Ouest en raison notamment de la proximité des grandes IAA, l'Alsace et les Flandres qui ont un fort potentiel agricole à valoriser, la Picardie et la Bresse.

Le découpage de la France en deux parties (régions fortement productives d'un côté et régions faiblement productives de l'autre) que nous avons effectué pour réaliser les simulations est simpliste, certes, mais il donne une représentation approchée de l'agriculture française si ce scénario contrasté se réalisait.

⁽⁴¹⁾ La disparition de l'agriculture serait davantage marquée dans les espaces où la terre peut avoir d'autres usages (plus « rentables ») ou dans certaines zones fragiles (marais par exemple). En revanche, il peut y avoir pression pour son maintien dans des zones fragiles comme les zones de montagne.

Carte n° 3.
Consommation
unitaire d'azote
(kg N/ha) -
Scénario contrasté
n° 1 (2010)



Commentaires :

La consommation d'azote est de 119 kg/ha dans les régions fortement productives (avec une augmentation importante de la fertilisation unitaire pour les groupes faisant de l'élevage) tandis qu'elle atteint à peine 50 kg/ha dans les régions faiblement productives.

La moyenne France, quant à elle, se situe autour de 77 kg/ha.

Scénario contrasté n° 2 : Légère augmentation de la demande alimentaire sur le marché international, augmentation des échanges non alimentaires et amélioration de la compétitivité de la France

La demande mondiale de produits agricoles alimentaires augmenterait légèrement dans les PVD mais aussi dans les Pays de l'OCDE (*quest. 1,3,4 : « de 105 % à 115 % »*). Parallèlement, les échanges non alimentaires augmenteraient sensiblement (*quest. 10 : « de 25 % à 30 % »*).

La protection de l'environnement aurait un poids important en Europe (*quest. 21 : « plus de 135 % »*) et on donnerait priorité à l'extensification.

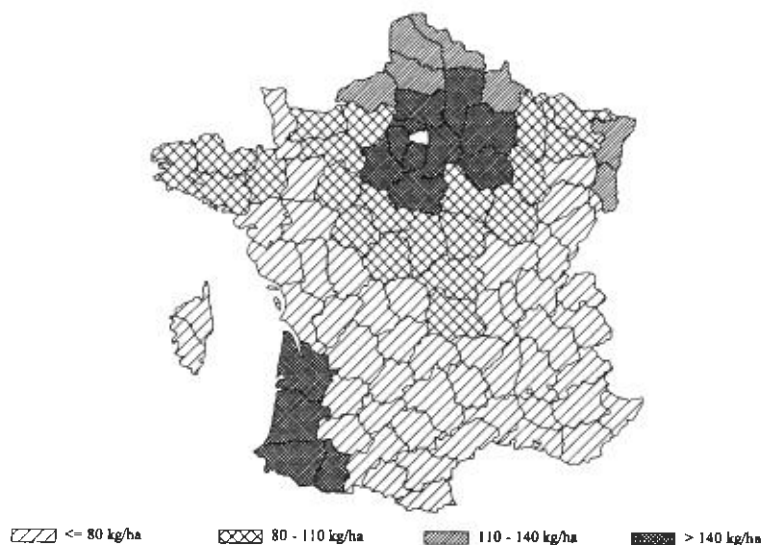
La part des exportations françaises dans les exportations mondiales serait plus importante qu'actuellement (*quest. 32 : « de 10 % à 11 % »*).

Avec une baisse des prix de 30 % environ par rapport à 1990 et des aides au revenu faibles pour les grandes exploitations (*quest. 14 : « de 5 % à 10 % »*) et élevées pour les petites (*quest. 15 : « plus de 40 % »*), le secteur agricole français serait caractérisé par :

- une production accrue de produits végétaux à usage alimentaire (céréales en particulier) ou non alimentaire (diester par exemple) (*quest. 36 : « de 2 % à 3 % » par an*),

- 500 000 exploitations agricoles (contre 900 000 en 1990) dont la majorité à temps partiel,
- une proportion non négligeable d'exploitants agricoles dont l'une des activités serait l'entretien des terres dans un but non productif (*quest. 44*: « de 10 % à 20 % »),
- une augmentation de la taille des exploitations (*quest. 57*: « de 1 % à 2 % » *par an*, *quest. 58*: « 2 % à 3 % » *par an*),
- une légère diminution de la fertilisation par hectare dans les grandes exploitations (*quest. 53*: « de 5 % à 25 % ») et une fertilisation stable dans les petites,
- des rendements par hectare cultivé plus élevés en raison des progrès techniques (*quest. 55, 56*: « de 1 % à 2 % » *par an*),
- pas de changement notable pour les OTEX,
- une diminution de la SAU entre 2 et 3 millions d'hectares,
- une plus grande proportion de terres arables (*quest. 74*: « de 60 % à 65 % ») et de céréales (*quest. 75*: « de 55 % à 60 % »).

Carte n° 4.
Consommation
unitaire d'azote
(kg N/ha) - Scénario
contrasté n° 2 (2010)



Commentaires :

Les régions consommatrices sont les mêmes qu'en 1990 et la fertilisation azotée unitaire moyenne passe de 90 kg/ha à 80 kg.

On constate que la fertilisation unitaire augmente généralement pour les OTEX 7, 8 (Polyculture et Culture élevage) et parfois pour l'OTEX 4 (Herbivore), alors qu'elle a tendance à diminuer pour l'OTEX 1 (Céréales et Grandes Cultures).

Scénario contrasté n° 3 : Stagnation de la demande alimentaire dans le monde et développement important des débouchés non alimentaires en France (bio-carburant : scénario 3A ou bois : scénario 3B)

La demande de produits alimentaires sur le marché mondial serait assez stable, mais il y aurait augmentation des échanges non alimentaires (*quest. 10*: « plus de 30 % »).

En Europe, la protection de l'environnement aurait un poids très important (*quest. 21*: « plus de 135 % ») avec priorité à l'extensification et instauration d'une taxe de 30 % sur les engrais azotés.

La part des exportations françaises dans les exportations mondiales ne serait pas modifiée.

Dans ce contexte, on retiendra deux scénarios de PAC avec des conséquences sur l'agriculture française différentes. Le premier est plus axé sur le développement des bio-carburants comme le diester, tandis que le second privilégie davantage la forêt.

Notons que dans le premier scénario (3A), les importations françaises de produits agricoles sont un peu plus faibles que dans le second (3B). Cela explique en partie la différence de production entre les deux scénarios.

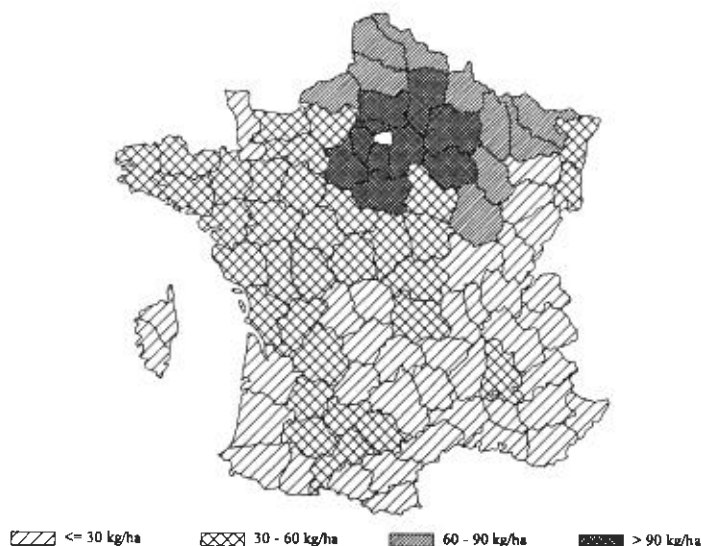
• Scénario 3A : Développement du diester

Le scénario de la PAC retenu ici est un faible soutien des prix agricoles européens (*quest. 13*: « moins de 65 % ») et des aides au revenu élevées surtout pour les petites exploitations (*quest. 14*: « de 20 % à 30 % », *quest. 15*: « plus de 40 % »).

Les conséquences sur le secteur agricole français seraient :

- une croissance des livraisons végétales (*quest. 36*: « de 1 % à 2 % » par an) avec relativement moins de céréales (*quest. 39*: « de 15 % à 25 % ») et plus d'oléagineux en raison notamment du développement du diester (*quest. 40*: « de 10 % à 15 % »),
- une stagnation des livraisons animales,
- un tiers d'exploitations agricoles en moins,
- des exploitations pour la plupart à temps complet et dont la majorité seraient très grandes (*quest. 43*: « de 50 % à 60 % », *quest. 57*: « de 2 % à 3 % », *quest. 5*: « de 1 % à 2 % »),
- une diminution notable de la consommation d'engrais, surtout dans les grandes exploitations, (*quest. 53*: « de 25 % à 35 % », *quest. 54*: « de 5 % à 25 % ») et des rendements par hectare cultivé quasiment stables (*quest. 55, 56*: « de 0 % à 1 % » par an),
- pas de changement attendu pour les OTEX ni pour les spécialisations des régions,
- une diminution de la SAU entre 3 et 4 millions d'hectares avec une diminution des terres arables (*quest. 74*: « entre 50 % et 55 % ») et des céréales (*quest. 75*: « entre 45 % et 50 % »).

Carte n° 5.
Consommation
unitaire d'azote
(kg N/ha) - Scénario
contrasté
n° 3A (2010)



Commentaires :

Par rapport à 1990, la fertilisation azotée moyenne par hectare diminue fortement en passant de 90 kg N/ha à 55 kg. La part des oléagineux dans le volume des produits végétaux augmente considérablement. On note aussi un accroissement de la friche car l'utilisation de la terre à des fins agricoles est moins rentable (baisse importante du prix des non-oléagineux, quasi-stabilité des rendements et augmentation significative des charges variables).

Le Bassin parisien correspond toujours à la région la plus fertilisée, le Sud-Ouest, aujourd'hui encore très fertilisé, appartient, en 2010, aux régions les plus extensives (passage de 138 kg N/ha à 18 kg!). L'Alsace aussi voit sa fertilisation diminuer significativement alors que la région comprenant la Côte-d'Or, la Haute-Marne, la Meurthe-et-Moselle, la Meuse et la Moselle garde une fertilisation unitaire sensiblement identique.

• Scénario 3B: Développement de la forêt et nouvelles fonctions pour l'agriculture

Dans ce scénario, on fait l'hypothèse que la PAC n'existe pratiquement plus en 2010 :

- pas de soutien pour les prix agricoles européens (*quest. 13*: « moins de 65 % »)
- aides au revenu uniquement pour les petites exploitations afin de les maintenir en vie (*quest. 14*: « moins de 5 % », *quest. 15*: « de 20 % à 30 % »).
- plus de maîtrise de l'offre.

Le secteur agricole serait alors composé d'un secteur compétitif guidé

par le marché, d'un secteur assisté socialement et d'un secteur d'agro-tourisme ou agro-nature marchand avec des externalités positives sur l'espace.

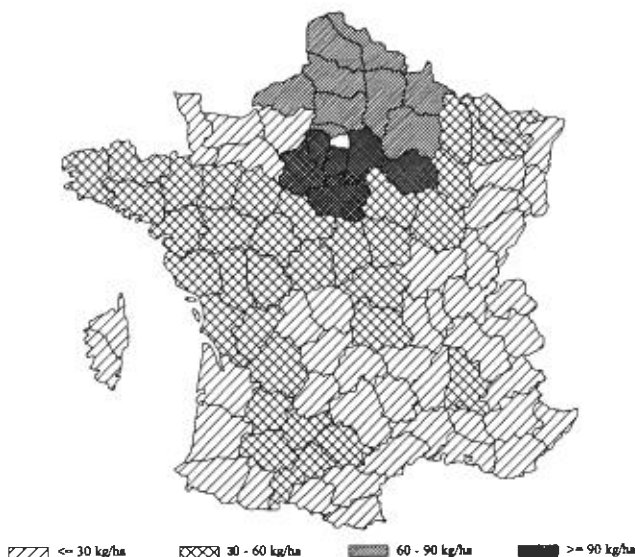
Il aurait comme caractéristiques :

- une quasi-stagnation des livraisons végétales (*quest.* 36 : « de 0 % à 1 % » *par an*),
- une diminution des livraisons animales (*quest.* 37 : « de - 1 % à 0 % » *par an*),
- plus de la moitié des exploitations en moins,
- des exploitations dont la plupart seraient très grandes (*quest.* 43 : « de 2 % à 3 % » *par an*, *quest.* 57 : « de 2 % à 3 % », *quest.* 58 : « de 1 % à 3 % » *par an*),
- une diminution notable de la consommation d'engrais (*quest.* 53, 54 : « de 25 % à 35 % ») et des rendements par hectare cultivé quasiment stables (*quest.* 55, 56 : « de 0 % à 1 % » *par an*),
- une diminution de la SAU entre 1 et 2 millions d'hectares avec une légère augmentation des terres arables (*quest.* 74 : « entre 60 % et 65 % »),
- le développement de la forêt paysanne,
- une modification de la structure des OTEX pour prendre en compte les nouvelles fonctions de l'agriculture (produits fermiers et tourisme, système agro-sylvo-pastoraux, agriculture et service).

Enfin, il est probable qu'il y ait aussi de grands changements dans les spécialisations des régions.

Compte tenu de ces bouleversements par rapport à 1990, on effectue des simulations sur AROPAJ uniquement pour estimer la consommation unitaire d'engrais par groupe. L'extrapolation pour la France entière est réalisée ensuite en faisant des hypothèses sur l'évolution de la SAU fertilisée.

Carte n° 6.
Consommation
unitaire d'azote (kg
N/ha) - Scénario
contrasté n° 3B
(2010)



La structure des OTEX subit un grand bouleversement par rapport à 1990.

Commentaires :

La fertilisation azotée unitaire pour la France entière passe de 90 kg/ha à 49 kg. Le Centre et le Nord correspondent toujours aux régions les plus fertilisées. Le Sud-Ouest, l'Alsace, une partie de la Bresse et de la Normandie voient leur fertilisation diminuer très fortement. Pour certaines OTEX, comme l'OTEX 4 (Herbivore), elle tend même vers 0. Cela signifie qu'une partie de la France verra son agriculture (au sens traditionnel du terme) disparaître pour laisser la place à la forêt, à des parcs naturels, etc. La surface agricole fertilisée est beaucoup diminuée.

- **Scénario contrasté n° 4 :** Stagnation de la demande de produits agricoles sur le marché international et agriculture française non compétitive.

Dans ce scénario, il n'y aurait pas de nouveaux débouchés à part une légère augmentation de la demande alimentaire des PVD (*quest. 1 : « de 105 % à 115 % »*).

Les prix agricoles européens seraient bas (*quest. 13 : « moins de 65 % »*) et les aides au revenu élevées (*quest. 14 : « de 30 % à 40 % », quest. 15 : « plus de 40 % »*).

Le budget environnement serait assez important (*quest. 21 : « de 115 % à 125 % »*) et on accorderait une priorité à l'extensification.

La compétitivité de la France sur le marché mondial diminuerait beaucoup (*quest. 32 : « de 7 % à 8 % »*) et sa production végétale serait quasiment stable (*quest. 36 : « de 0 % à 1 % » par an*) tandis que sa production animale diminuerait légèrement (*quest. 37 : « de - 1 % à 0 % » par an*).

La production de végétaux à usage non alimentaire augmenterait un peu (*quest. 41 : « de 5 % à 10 % »*), ce qui entraînerait une légère baisse de la part des céréales dans les livraisons végétales (*quest. 39 : « de 25 % à 30 % »*).

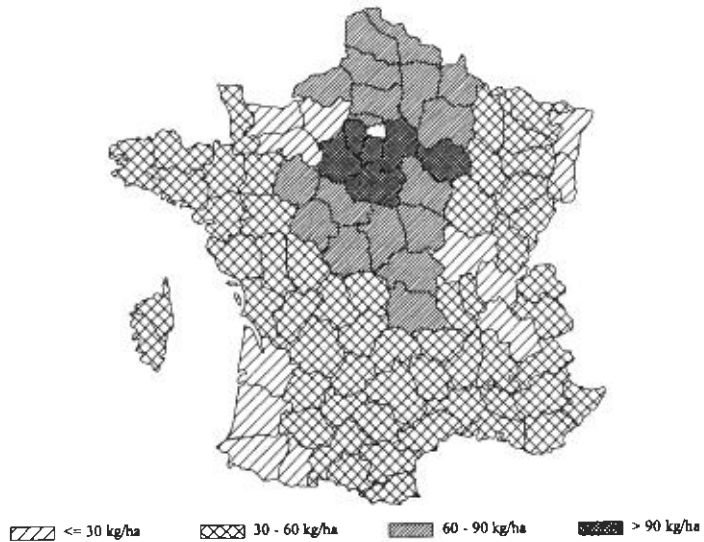
Plus de la moitié des exploitations agricoles viendraient à disparaître d'ici 2010. La plupart des exploitations restantes seraient très grandes (*quest. 43 : « de 70 % à 80 % », quest. 57,58 : « de 2 % à 3 % » par an*).

Le système de production dominant serait le système intégré et il y aurait diminution de la fertilisation surtout dans les petites exploitations (*quest. 53 : « de 5 % à 25 %, quest. 54 : « de 25 % à 35 % »*).

Les rendements seraient quasiment stables (*quest. 55,56 : « de 0 % à 1 % » par an*).

Enfin, la SAU perdrait entre 3 et 4 millions d'hectares et il y aurait moins de terres arables (*quest. : 74 : « de 50 % à 55 % »*).

Carte n° 7.
Consommation
unitaire d'azote
(kg N/ha) -
Scénario contrasté
n° 4 (2010)



Commentaires :

Les commentaires sont les mêmes que pour le scénario 3B (forêt) avec une diminution un peu moins faible des fertilisations azotées unitaires que l'on peut attribuer à l'absence de taxe sur les engrais.

Consommation totale d'engrais en France à l'horizon 2010

Pour estimer la consommation totale d'engrais en France en 2010 (cf. tableau des résultats), il suffit de multiplier la consommation unitaire moyenne par la SAU fertilisée. Celle-ci correspond en général à la SAU totale donnée par les experts du Delphi sur la PAC (sa valeur est confrontée aux résultats du périphérique sur la démographie). Cependant, pour le scénario 3B impliquant un changement profond dans la typologie des groupes (apparition de groupes spécialisés dans la forêt paysanne ne nécessitant pas d'engrais), la SAU fertilisée est inférieure à la SAU totale. Sa valeur est estimée par expertise à partir du paramètre : part de la forêt paysanne sur la SAU totale.

Tableau des résultats. Consommation totale en engrais azotés à l'horizon 2010
(Il s'agit de l'élément azote N)

Scénario du Delphi	SAU anticipée dans le Delphi (Méga ha)	SAU fertilisée (Méga ha)	Consommation unitaire (kg/ha)	Consommation totale d'azote (Méga t)	Variation par rapport à la référence
médian	27-28	27,5	69	1,9	-25 %
1	26-27	26,5	77	2,04	-19 %
2	27-28	27,5	80	2,2	-13 %
3A	26-27	26,5	55	1,46	-42 %
3B	28-29	19,7	49	0,97	-62 %
4	26-27	26,5	53	1,4	-44 %
Référence (1990)	28	28	90	2,52	

Tests de sensibilité

De nombreux tests de sensibilités ont été faits afin de déterminer les paramètres les plus influents du modèle. Il s'agit notamment :

– *du prix des produits végétaux* (céréales en particulier)

Lorsque les prix baissent, les agriculteurs substituent aux cultures de ventes, gourmandes en azote, de la prairie ou du gel et la consommation totale d'azote diminue.

– *de l'effectif animal par exploitation*

L'effectif animal détermine la part de SAU consacrée aux fourrages et à la prairie qui sont des cultures faiblement fertilisées. S'il augmente, la consommation d'engrais diminue, et ce d'autant plus que l'engrais d'origine animale peut se substituer à l'engrais chimique.

Une des conséquences de l'ESB (encéphalite spongiforme bovine) pourrait être l'augmentation de cette part en raison de l'extensification de l'élevage... à moins que la protéine d'origine animale ne soit remplacée par la protéine végétale.

– *du prix des engrais azotés*

En réalisant des tests de sensibilité autour du scénario médian, on montre que l'instauration d'une taxe sur les engrais aurait des effets non négligeables sur leur consommation⁽⁴²⁾.

⁽⁴²⁾ La taxation des engrais a été au centre d'un certain nombre de travaux visant à apprécier son efficacité éventuelle (voir en particulier Bonnieux *et al.*, 1990). Elle serait assez efficace et moins coûteuse pour les agriculteurs en termes d'effet sur les revenus que la baisse du prix des produits agricoles.

– *des surfaces cultivées en légumineuses*

On montre qu'une augmentation de la culture de légumineuses comme le pois ou le soja implique une diminution de la demande d'engrais en France. Cependant, une telle hypothèse n'a pas été retenue par les experts car les débouchés pour ce type de produits agricoles ne sont pas très importants.

– *du rapport de prix céréales/léagineux*

S'il devient intéressant de cultiver du tournesol (pour une fin énergétique par exemple), la demande d'engrais diminue car cette plante est beaucoup moins gourmande en azote que ne le sont les céréales.

CONCLUSION

Après le bilan des résultats des simulations, donnant par scénario une vision globale de l'agriculture en 2010, nous discutons les hypothèses de travail puis tirons quelques leçons sur la méthode de prospective globale élaborée.

Bilan des simulations

Les résultats de cette étude prospective laissent apparaître que, d'ici 2010, la consommation d'engrais azotés en France devrait nettement diminuer. Cette diminution serait en grande partie imputable à un meilleur raisonnement de la fertilisation, les agriculteurs subissant de plus en plus la pression des « environnementalistes » dont les intérêts sont représentés à Bruxelles (mesures européennes de protection de l'environnement, PAC) et au niveau de chaque région française. La diffusion des innovations technologiques devrait aider les agriculteurs à améliorer leur conduite en matière de fertilisation : mise au point d'itinéraires techniques adaptés aux systèmes de cultures complexes et à la maîtrise des risques environnementaux, développement d'outils de gestion permettant aux agriculteurs de suivre correctement ces itinéraires (amélioration de l'information notamment).

On constate que, même si la France augmente d'ici 2010 sa production agricole pour faire face, par exemple, à une demande alimentaire croissante des Pays en voie de développement (scénarios contrastés 1 et 2), la consommation totale d'engrais azotés diminue quand même d'au moins 10 %. Les experts interrogés ont en effet fait l'hypothèse que les rendements ne diminueraient pas – certains ont même tablé sur leur augmentation – si l'on diminuait la fertilisation. Selon eux une fertilisation raisonnée alliée à l'utilisation de variétés de semences plus performantes pourrait permettre un accroissement de la production sans qu'il y ait massivement

recours aux engrais chimiques comme cela se pratique aujourd'hui. Les agriculteurs pourraient aussi utiliser davantage des engrais naturels issus de l'élevage ou des boues issues des stations d'épuration et d'industries.

De même, dans le scénario médian retenu par la majorité des experts, la production végétale française serait légèrement plus élevée qu'aujourd'hui, en raison notamment du développement des cultures non alimentaires, et la consommation d'engrais azotés diminuerait, quant à elle, de 25 %.

A *fortiori*, si la France voit sa production agricole stagner, voire baisser, la consommation d'engrais risque de diminuer plus encore, la réduction pouvant aller jusqu'à 60 % environ si une grande partie de la SAU est reconvertie en forêt ou en parcs naturels.

Discussion des hypothèses de travail

Ces résultats ne constituent pas des prédictions – ils sont d'ailleurs suffisamment dispersés pour décontenancer quiconque voudrait les utiliser tels quels pour faire des choix concernant le futur. Ils sont le fruit de simulations s'appuyant à la fois sur un modèle simplifié de la réalité et sur des dires d'experts. Les biais attachés à ces résultats sont donc de deux ordres :

– Le premier biais tient aux **hypothèses**, sans doute discutables, du modèle, notamment celles de la rationalité du choix des agriculteurs tant dans celui des spéculations culturelles que dans l'acquisition à long terme de nouveaux facteurs de production. Si dans les modèles – central (pour les spéculations) et périphériques (pour les facteurs fixes) –, ces choix résultent d'un comportement d'optimisation, nous sommes conscients que leur rationalité est dans la réalité plus limitée, au sens de H. Simon (l'information dont disposent les agriculteurs est imparfaite et les décisions qu'ils doivent prendre, risquées). Par exemple, en ce qui concerne le mode de production, nous avons souligné la complexité inhérente à la détermination de la dose d'azote optimale. Quelle que soit l'optique choisie (minimiser le risque de variations interannuelles du rendement ou optimiser la dose d'azote pour limiter les gaspillages), l'agriculteur doit interpréter les données dont il dispose (information imparfaite) et prendre sa décision dans l'incertain⁽⁴³⁾.

A l'horizon 2010, il est fort probable cependant, que le comportement rationalisateur des agriculteurs s'améliore, aidé en cela par les instituts de recherche mettant au point des modèles d'aide à la décision.

⁽⁴³⁾ Notons que dans cette étude prospective, le choix du mode de production n'a pas été entièrement modélisé sous forme de relations formalisées mais relève de l'appréciation des experts interrogés dans le Delphi sur la PAC.

D'autre part, l'hypothèse fondamentale sur laquelle repose cette étude est l'homogénéité des différents groupes d'exploitations agricoles.

Il est vrai que la localisation géographique joue sur les contraintes agronomiques (type de sol, climat) et sur le comportement des agriculteurs en matière de fertilisation (traditions, coopératives agricoles communes...).

De même, l'orientation-technico-économique d'une exploitation agricole implique des similitudes dans le comportement de l'agriculteur en raison notamment de la spécialisation culturelle et de l'importance des ressources en facteurs fixes.

Des études sur les séries passées du Réseau d'information comptable agricole ont d'ailleurs montré que les charges variables par culture étaient relativement homogènes dans les groupes du modèle AROPAJ (Jayet, 1990) et on peut, en première approximation, supposer qu'il en est de même pour le cas particulier des charges en engrais.

Toutefois, il faut bien reconnaître que cette hypothèse n'est pas vérifiée dans la réalité⁽⁴⁴⁾. Les agronomes savent combien il est difficile de transposer les meilleurs choix techniques d'une exploitation à l'autre. *« L'ère des modèles valables pour toutes les exploitations d'une région est terminée. Chaque exploitation est une entité économique qui doit vivre sa vie d'entreprise en fonction de ses forces et de ses faiblesses en valorisant ses atouts »*⁽⁴⁵⁾.

Enfin, un certain nombre d'hypothèses simplificatrices ont dû être faites lors de l'adaptation à l'horizon 2010 du modèle AROPAJ destiné préalablement au court terme.

En particulier, pour ne pas rendre les modèles périphériques trop sophistiqués (et par conséquent difficiles à nourrir avec des données de terrain), la typologie des exploitations du modèle AROPAJ n'a pas varié dans le temps. Seuls l'effectif et la SAU moyenne des groupes ont été projetés en 2010. Pourtant, à cet horizon, il est probable que de nouvelles OTEX apparaissent. Cette hypothèse a d'ailleurs été retenue par un expert pour le scénario (3B) *développement de la forêt paysanne*. Il a donc fallu utiliser un artifice pour estimer, dans ce contexte, la consommation totale d'engrais azotés à partir de la fertilisation unitaire moyenne simulée sur AROPAJ : la SAU fertilisée, inférieure à la SAU totale, a été estimée séparément en interrogeant des experts. Une telle extrapolation donne une estimation assez grossière de la consommation future d'azote dans le cas où la typologie des groupes est transformée. C'est ici sans doute que se situe la principale limite du modèle prospectif.

⁽⁴⁴⁾ Comme nous l'avons déjà souligné, la nouvelle version du modèle AROPAJ comporte d'ailleurs une typologie d'exploitations agricoles beaucoup plus fine avec 82 groupes au lieu de 38 et avec 691 sous-groupes.

⁽⁴⁵⁾ Actes du colloque de l'Association générale des producteurs de blé, AGPB, 1992, p. 29.

– Le deuxième biais est attribuable à l'utilisation de méthodes d'experts pour mieux cerner l'avenir et construire des scénarios d'évolution cohérents. Ces scénarios proviennent des réponses apportées par les experts à trois séries de questions : une série concernant l'industrie de l'ammoniac, une seconde le Delphi sur la fixation de l'azote et enfin une troisième constituée de questions nombreuses et dépendantes pour le Delphi sur la PAC. Le lien qui existe entre les questions dans ce dernier Delphi est sans doute à l'origine de certaines *erreurs* au niveau de l'estimation des paramètres par les experts. En effet, ces derniers ont dû avoir quelques difficultés pour assurer, d'un bout à l'autre du questionnaire (comportant 75 questions), la cohérence de toutes leurs réponses (l'utilisation rigoureuse de la méthode Delphi oblige l'indépendance des questions). Notons que les modèles périphériques ont permis de vérifier la cohérence des projections pour un grand nombre de paramètres. Cependant toutes les relations (à long terme) ne peuvent pas être modélisées et seuls les experts sont à même de faire des prévisions. Mais, que fait exactement un expert quand il répond à un questionnaire ? Ses prévisions sont-elles plausibles ? En particulier, comme cela est supposé dans certains scénarios, les rendements peuvent-ils continuer à augmenter alors que la fertilisation unitaire (chimique), diminue ? Progrès techniques importants et/ou utilisation accrue d'engrais d'origine naturelle comme l'engrais vert ou le lisier ? La réponse à cette question est cruciale pour l'évolution du secteur agricole car, si l'on se fie aux résultats des simulations, une forte augmentation des rendements alliée à une diminution des charges en engrais implique le maintien du revenu des agriculteurs même dans le cas où les prix agricoles baissent, comme cela est prévu avec la nouvelle PAC. Il en résulterait une augmentation de la production agricole française (plus de terres mises en culture par les agriculteurs restant en activité) et une consommation d'engrais azotés totale plus faible qu'aujourd'hui, certes, mais dont la variation, en valeur absolue, serait moindre que la variation unitaire. A titre d'exemple, dans le cadre du scénario médian où la consommation d'azote par hectare est diminuée de 25 %, si l'on suppose que les rendements augmentent de 2 % par an (ce qui correspond à la fourchette haute de l'estimation des experts), alors le taux annuel d'évolution de la production végétale est supérieur à 2 % et la consommation totale d'azote subit une diminution de 22 %. Profitons-en pour noter que, toujours avec le scénario médian, si les rendements augmentent seulement de 1 % par an (fourchette basse de l'estimation des experts), le taux annuel d'évolution de la production végétale est de 0,38 % et la variation de la consommation totale d'azote de – 36 %.

Apport méthodologique

Alors y-a-t-il cohérence ou incohérence des résultats fournis par le modèle que l'on a nourri avec les estimations des experts ? La meilleure façon de le savoir serait de communiquer à ces experts les résultats obtenus avec leur propre scénario. Si ces résultats ne leur convenaient pas, ils pourraient

soit revenir sur leurs anticipations, ce qui définirait des scénarios plus cohérents, soit donner des indications pour améliorer le modèle. Ainsi, après plusieurs itérations « experts-modèle », on pourrait améliorer sensiblement les résultats en réduisant les deux types de biais que l'on a soulignés. En particulier, pour les paramètres cruciaux, il faudrait que les experts puissent se positionner sur des fourchettes d'évolution plus resserrées.

Par rapport à d'autres études prospectives réalisées à l'INRA (cf. Sebillotte et Lecœur, 1996), l'originalité de cette démarche est la construction d'un modèle de simulations permettant de réaliser ces confrontations entre les experts et le modèle. Les experts se prononcent sur la réalisation ou non d'un ensemble d'hypothèses et le modèle traduit ces scénarios sous forme de résultats quantitatifs. Il s'agit bien d'un exercice de prospective car même les hypothèses de rupture peuvent être traduites de cette manière.

Pour qu'il y ait résultats quantitatifs, il faut pousser la modélisation du système assez loin et formaliser un certain nombre de relations, ce qui nécessite de faire des hypothèses simplificatrices dont il faut tenir compte lors de l'interprétation des résultats.

Les résultats ne doivent donc pas être considérés comme des prévisions fiables, attachées de façon certaine à la réalisation de tel ou tel scénario. L'intérêt principal du modèle de simulations réside avant tout dans la meilleure connaissance du système appréhendé : mise en évidence des hypothèses clés qui ont une grande influence sur l'objet étudié, détection de liens *a priori* non identifiés (parfois même contre-intuitifs) entre les variables du système (rétroactions inattendues ou effet boule de neige), etc.

A notre avis, modélisation et méthodes de prévision qualitatives comme les enquêtes d'opinion sont complémentaires et il est particulièrement enrichissant de faire jouer cette complémentarité pour étudier des systèmes complexes représentant des secteurs économiques. La méthode proposée est, nous semble-t-il, une avancée dans la recherche qui est menée actuellement en prospective (prospective globale notamment).

Par ailleurs, l'analyse systémique qui a été réalisée pour la construction de ce modèle prospectif est riche d'enseignements.

Elle a permis de bien situer l'exploitation agricole et ses variables technico-économiques⁽⁴⁶⁾ au sein d'un ensemble beaucoup plus vaste, le secteur agricole français, lui-même inséré dans le tissu socio-économique national et dépendant aussi de l'évolution du contexte international.

Cette représentation met en évidence les relations (bilatérales) qui existent entre les décisions prises au niveau de l'exploitation agricole et l'extérieur (enjeux économiques, politiques, sociaux...). Elle conduit à interroger

⁽⁴⁶⁾ Les variables économiques intervenant dans l'estimation du profit et les contraintes agronomiques du milieu naturel.

des experts d'horizons multiples : professionnels agricoles, industriels (secteurs amont et aval du secteur agricole), responsables institutionnels des différentes organisations nationales ou internationales, responsables politiques (au niveau national ou local), chercheurs appartenant à des disciplines très variées (économistes, sociologues, biologistes, agronomes...).

Si l'on souhaite développer une agriculture reproductible, plus respectueuse de l'environnement, axée sur la qualité des produits et capable de s'adapter aux fluctuations des cours de marché, c'est bien cette vision systémique, interdisciplinaire, qu'il convient d'adopter pour mettre au point les innovations technologiques nécessaires (méthodes d'aide à la décision au niveau tactique et stratégique, amélioration de la performance des intrants...) et pour qu'elles soient acceptées par tous les acteurs concernés.

BIBLIOGRAPHIE

- AGPB, 1992 — Actes du 68^e congrès, Rouen, 17-18 juin.
- ALBECKER (C.), LEFEBVRE (C.), 1985 — Un modèle économétrique de l'agriculture française, *Economie Rurale*, n° 165, janvier, pp. 27-33.
- ALLAIN (S.) et SEBILLOTTE (M.), 1991 — Equipement et fonctionnement des exploitations. Contribution pour une meilleure aide à la décision, *Economie Rurale*, n° 206, pp. 81-87.
- ATTONATY (J.-M.), LAPORTE (C.), PAPY (F.), SOLER (L.-G.), 1989 — Vers de nouveaux modèles d'aide à la décision en agriculture, *Annales des Mines*, juin, pp. 39-48.
- BAREL (Y.), 1973 — Vers une méthode et une épistémologie de la prospective sociale, Colloque Prospective et pensée du futur, mai, CIE-PHUM, Mons, 36 p.
- BAREL (Y.), 1971 — Prospective et analyse de systèmes, *La Documentation Française*, février, 173 p.
- BOIFFIN (J.), CANEILL (J.), MEYNARD (J.-M.), SEBILLOTTE (M.), 1981, 1982 — Elaboration du rendement du blé d'hiver en Champagne crayeuse : I. Protocole et méthode d'étude d'un problème technique régional ; II. Types de réponse à la fumure azotée et application de la méthode du bilan prévisionnel ; III. Influence des variations pédologiques, conséquences pour la conduite de la culture, *Agronomie* ; 1 (7) ; 1 (9) ; 2 (7).
- BONNIEUX (F.), FOUET (J.-P.), RAINELLI (F.), VERMERSCH (D.), 1990 — Intensification de l'agriculture et environnement, *INRA Sciences Sociales*, n° 5, septembre.

- BONNY (S.), 1996 — Les biotechnologies en agriculture, *Revue Futuribles*, juillet-août, pp. 51-76.
- BONNY (S.), 1993 — Le changement technique en cours et à venir en agriculture : un essai de bilan dans les différents secteurs, INRA-ESR Grignon, *Etudes Economiques*, n° 12, novembre, 134 p.
- BONNY (S.), 1991 — L'évolution technologique en cours en agriculture et ses conséquences, INRA-ESR, Grignon, *Notes et Documents*, n° 39, septembre, 91 p.
- BONNY (S.), CARLES (R.), 1993 — Perspectives d'évolution de l'emploi des engrais et des phytosanitaires dans l'agriculture française, *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales*, n° 26, pp. 30-62.
- BOUSSARD (I.), WOLFER (B.) (dir.), 1991 — Quel avenir pour l'agriculture et le monde rural ?, *Economie Rurale*, n° 202-203, 124 p.
- BYÉ (P.), CHANDRON (J.-J.), PERRIN (J.), 1989 — Les déterminants de l'innovation en agriculture à travers la littérature sur le machinisme et les engrais, *Cahiers d'Economie et Sociologie Rurales*, n° 10, pp. 65-96.
- CAVAILHÈS (J.), RICHARD (A.), TAVERDET (N.), 1996 — Des rentes classiques aux options de rentes : une analyse de l'évolution du prix des terres en France, *Revue Economique*, vol. 47, n° 4, juillet, pp. 963-981.
- COMMISSION DES COMMUNAUTÉS EUROPÉENNES, 1991 — Evolution et avenir de la Politique agricole commune : propositions de la Commission, *Europe verte*, n° 2.
- CORPEN, 1987 — Amélioration des pratiques agricoles pour réduire les pertes de nitrates vers les eaux, décembre, Paris, 40 p.
- FORRESTER (J.W.), 1961 — *Industrial Dynamics*, Cambridge, Miss., the MIT Press, 464 p.
- GODET (M.), 1991a — *De l'anticipation à l'action*, Paris, Dunod, 390 p.
- GODET (M.), 1991b — La prospective, une indisciplinette intellectuelle, *Economie Appliquée*, tome XLIV, n° 4, pp. 161-183.
- GODET (M.), 1985 — *Prospectives et planification stratégique*, CPE, Economica.
- GONOD (P.-F.), 1996 — Dynamique des systèmes et méthodes prospectives, *Travaux et Recherches de Prospective*, n° 2, mars, 68 p.
- GONOD (P.-F.), 1990 — Dynamique de la prospective, *Etude du CPE*, n° 136, Paris, Aditech, 160 p.
- HATEM (F.), CAZES (B.), ROUBELAT (F.), 1993 — *La prospective : pratiques et méthodes*, Paris, Economica, 385 p.

- INRA, 1992 — *La recherche agronomique. Préparer l'avenir*, Paris, INRA.
- JANTSCH (E.), 1967 — *La prévision technologique*, Paris, OCDE.
- JAYET (P.-A.), HOFSTETTER (A.), 1996a — Agricultural supply modelling for the cape: a modular approach based on linear programming, INRA-ESR Grignon, 17 p.
- JAYET (P.-A.), BIRFET (A.), HOFSTETTER (A.), 1996b — Forêt paysanne et Politique agricole commune: une évaluation des impacts d'une incitation au reboisement, à paraître, 23 p.
- JAYET (P.-A.), 1994 — Revenus et politiques agricoles, efficacité et équité, un modèle pour des réponses quantifiées, *Economie Rurale*, n° 220-22, mars-juin.
- JAYET (P.-A.), 1993 — Prix, productions et revenus agricoles: une mesure des effets d'une réforme de la Politique agricole commune, INRA - ESR Grignon, *Etudes Economiques*, n° 10, septembre.
- JAYET (P.-A.), TAVERDET (N.), 1991 — Modèle d'offre agricole et Politique agricole commune: paramètres, coefficients et variables des programmes linéaires, INRA-ESR Grignon, février, 38 p.
- JAYET (P.-A.), 1990 — Maîtrise de l'offre: qui va payer?, *Perspectives Agricoles*, n° 144, pp. 27-36.
- KAYSER (B.), 1992 — L'avenir des espaces ruraux: choix de société et volonté politique, *Revue Futuribles*, juillet-août, pp. 3-27.
- KLATZMANN (J.), 1996 — L'alimentation des hommes: où allons-nous?, *Revue Futuribles*, septembre, pp. 39-58.
- KLATZMANN (J.), 1990 — L'agriculture mondiale demain: excédents ou pénurie?, *Revue Futuribles*, février, pp. 3-22.
- LE MOIGNE (J.-L.), 1990 — *La modélisation des systèmes complexes*, Paris, Dunod.
- LE MOIGNE (J.-L.), 1977 — *La théorie du système général: théorie de la modélisation*, Paris, PUF, 3^e édition mise à jour, 330 p.
- LE ROY (P.), 1994 — *L'avenir des agricultures françaises*, Que sais-je? Paris, PUF, 127 p.
- LESOURNE (J.), 1989 — Plaidoyer pour une recherche en prospective, *Revue Futuribles*, n° 137, novembre, pp. 85-89.
- LESOURNE (J.), STOFFAES (C.), 1997 — *La prospective stratégique d'entreprise: concepts et études de cas*, Paris, Dunod, 276 p.
- MAHÉ (L.-P.), ALBECKER (C.), LEFEBVRE (C.), 1983 — Une représentation macro-économique de l'agriculture française: MAALT (projet 1990 et variantes), *Economie Rurale*, n° 157, septembre, pp. 67-81.

- MATHURIN (J.), 1992 — Réformes de la PAC: ajustements pour les productions animales, INRA-ESR Grignon, Mémoires et Thèses, Série AROPAJ, n° 5, octobre, 111 p.
- MEYNARD (J.-M.), 1985 — Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver, Thèse de docteur Ingénieur, INA-PG Paris, 258 p. + ann.
- MEYNARD (J.-M.), GIRARDIN (P.), 1991 — Produire autrement, Communication au 1^{er} Forum de la fertilisation raisonnée, Strasbourg, COMIFER, 26-27 septembre, 23 p.
- MONTALESCOT (J.-B.), 1992 — Localisation et guidage automatique des machines agricoles, *Bulletin technique du machinisme et de l'équipement agricole* (CEMAGREF), n° 63, mars-avril, pp. 21-33.
- NEVEU (A.), 1992 — Quelle agriculture demain?, Paris, Caisse Nationale de Crédit Agricole, 9 p.
- PEP YEAR BOOK INTERNATIONAL, 1988 — Données techniques et financières, SRI Consulting.
- RATTIN (S.), 1992 — 700 000 exploitations en l'an 2000, *Agreste Cahiers*, n° 9, pp. 3-8.
- SAINT-PAUL (R.) et TÉNIÈRE-BUCHOT (F.), 1974 — *Innovation et évaluation technologiques: sélection des projets, méthodes de prévision*, Entreprise moderne d'édition, Technique et documentation.
- SEBILLOTTE (M.), 1996 — *Les mondes de l'agriculture: une recherche pour demain*, INRA, Sciences en Question, éd., 258 p.
- SEBILLOTTE (M.), LECŒUR (H.), 1996 — *Prospective sur l'avenir du secteur semencier: répercussions pour la politique de l'INRA*, Rapport de la DADP (INRA), novembre.
- SEBILLOTTE (M.), 1991 — Some concepts for analysing farming and cropping systems and for understanding their different effects, Proceeding of the inaugural congress, European Society of Agronomy, 5-7 december 1990, Paris, pp. 1-16.
- SEBILLOTTE (M.), 1978 — Itinéraires techniques et évolution de la pensée agronomique, *C.R. Acad. Agric. Fr.*, 64 (9), pp. 906-913.
- TAVERDET-POPIOLEK (N.), 1997 — Présentation des données extraites par Guy Fauconneau pour l'étude Bilan Protéines au niveau mondial, Document INRA, DADP, septembre, 56 p.
- TAVERDET-POPIOLEK (N.), 1996 — Modèle prospectif de la consommation d'énergie dans l'agriculture: le cas de la fertilisation azotée à l'horizon 2010, INRA-ESR Grignon, *Etudes Economiques*, n° 25, juin, 115 p.

- TAVERDET-POPIOLEK (N.), 1994 — La fixation de l'azote: la parole aux experts, *Biofutur*, n° 131, février, p. 41.
- TAVERDET-POPIOLEK (N.), 1993 — Modèle prospectif de la consommation d'énergie dans l'agriculture: le cas de la fertilisation azotée à l'horizon 2010, Thèse de Doctorat d'Economie appliquée, 423 p.
- TAVERDET-POPIOLEK (N.), 1993b — *Enquête Delphi sur la PAC, Résultats*, Document INRA, ESR, janvier, 131 p.
- TIREL (J.-C.), 1991 — Les métiers des agriculteurs, Communication au 1^{er} forum européen de la fertilisation raisonnée: *Quelles fertilisations demain?*, Strasbourg, septembre, COMIFER, pp. 3-9.
- VALETTE (E.), 1991 — La structure des exploitations de l'an 2000: pronostics, *Structures agricoles*, n° 2, pp. 5-17.
- VAN DEN BOSSCHE (L.), 1990 — Capteurs et électroniques dans l'agriculture française et américaine, *Perspectives agricoles*, n° 150, août-septembre, pp. 63-76.
- WALLISER (B.), 1977 — *Systèmes et modèles: introduction critique à l'analyse de systèmes*, Paris, Le Seuil, 248 p.
- ZITT (M.), 1979 — Les méthodes intuitives de type DELPHI en prévision-évaluation technologique: éléments pour délimiter leur usage légitime, Thèse de Doctorat, Université Paris-Dauphine, 215 p.