

## Des solutions agronomiques à la pollution azotée

Anne Lacroix

**F**ace à la pollution des eaux par les nitrates d'origine agricole, trois types de solutions sont envisagés : la solution palliative de la dilution, du changement de captage ou de son approfondissement, la solution curative du traitement des eaux et la solution préventive qui mise sur une évolution des systèmes de production agricole. Bien que les actions palliatives soient actuellement les plus répandues, elles ne sont guère appelées à se développer du fait de l'accroissement du nombre de captages contaminés. En revanche, on pourrait recourir de plus en plus au traitement des nitrates de l'eau potable car, compte tenu des procédés dont on dispose aujourd'hui, cette solution se révèle simple et efficace [3]. Pourtant, à plus long terme, la prévention s'avère incontournable.

Pour l'heure, les solutions agricoles sont loin d'être évidentes : elles nécessitent la coordination de l'ensemble des acteurs d'un même bassin hydrologique (agriculteurs, organisations professionnelles, acteurs institutionnels, organismes techniques...) et la capacité de tous à modifier des comportements dans un domaine où les routines sont fortes, d'autant que, dans un contexte de baisse des prix, la perspective d'adopter de nouvelles pratiques culturales n'est pas très attrac-

tive, la perte de revenu paraissant inévitable.

En outre, la prévention ne peut prétendre à des résultats immédiats. D'une part, les nitrates migrent lentement vers les nappes souterraines (entre 0,5 [8] et 1,8 mètre [9] par an). Quand bien même leurs émissions seraient stoppées, la qualité de l'eau ne s'en trouverait pas pour autant améliorée, compte tenu des quantités de nitrates stockées dans les sols et sous-sols. D'autre part, la pollution nitrique diffuse est un processus complexe qui varie fortement d'un lieu à un autre et dans lequel tous les phénomènes n'ont pas encore été élucidés.

En effet, les agronomes mettent en évidence que le transfert des nitrates dans les sols résulte d'un grand nombre de facteurs interdépendants : facteurs climatologiques (importance des précipitations, leur répartition dans le temps, températures, évapotranspiration), agrolologiques (propriétés physicochimiques, hydrodynamiques et microbiologiques des sols), agronomiques (type de culture, travaux culturaux, niveau de fertilisation, couverture végétale, profondeur d'enracinement).

Du fait de la complexité du phénomène, de l'impossibilité de maîtriser certains facteurs, du délai de réponse de certaines nappes, les agronomes raisonnent en général en termes de risques de pollution nitrique, hiérarchisés en fonction du niveau de vulnérabilité du milieu et de l'appréciation des pratiques culturales qui lui sont associées.

Sebillotte et Meynard [10] proposent d'évaluer le milieu en fonction de deux critères :

– les risques de lixiviation de l'azote au-delà des racines les plus profondes durant le cycle cultural, risques qui dépendent du bilan hydrique et de la profondeur de sol accessible par les racines ;

– la variabilité interannuelle des potentialités agricoles, sachant que plus celle-ci est grande, plus il est difficile de prévoir correctement les besoins en azote.

Certains systèmes de culture accroissent ces risques, notamment le maïs, et ceci pour deux raisons majeures [11, 12] :

– le maïs laisse le sol nu pendant l'hiver qui précède son semis, alors que le drainage et l'entraînement en profondeur des nitrates, bien que dépendants des conditions climatiques et du type de sol, restent largement déterminés par la présence ou non d'une couverture végétale durant la période hivernale ;

– une surfertilisation azotée ne pénalise pas le rendement du maïs qui, de ce fait, est souvent considéré comme une culture « poubelle » capable de recevoir des doses d'azote bien au-delà du nécessaire et de résorber ainsi les excédents d'effluents d'élevage.

Toutefois, certains auteurs ne se bornent pas à repérer les utilisations excessives de fertilisants et à élaborer une échelle de risques pour les différentes cultures. Une hypothèse beaucoup plus systématique considère qu'une partie de la pollution nitrique constatée aujourd'hui pourrait résulter d'une plus forte intensité de la minéralisation des sols qu'autrefois, même si le taux de matière organique a diminué [13]. En effet, quand on apporte de l'azote, une partie (20 à 30 %) est prélevée par la microflore du sol et se

A. Lacroix : Inra-Esr, équipe régulation et agriculture, BP 47, 38040 Grenoble cedex 09, France.

Tirés à part : A. Lacroix

trouve convertie en humus ; or cet azote récemment organisé est plus facilement minéralisable que l'humus ancien. L'augmentation des intrants azotés conduirait donc à augmenter le volume des restitutions organiques du sol dont la vitesse de renouvellement est rapide ; ceci provoquerait un accroissement de la capacité de minéralisation des sols, conséquence indirecte et à long terme de l'intensification agricole. Cette hypothèse est confirmée par des travaux anglais mettant en évidence que seul un retour à des niveaux de production beaucoup plus faibles pourrait permettre de diminuer notablement la minéralisation dans les sols d'agriculture intensive et, donc, de réduire les risques de fuites de nitrates [14].

Les problématiques agronomiques passées en revue ci-dessus révèlent donc deux manières d'aborder le problème de la pollution nitrique :

- la première consiste à raisonner à univers technique constant et à faire des recommandations dans le cadre d'une agriculture très productive. Ces recommandations, applicables à court terme, visent simplement à améliorer la manière de conduire les cultures, en gérant mieux les intrants azotés et l'interculture ;

- la deuxième opte pour la remise en cause du modèle technique actuel et s'inscrit dans une démarche systémique et spatialisée dans une perspective d'« agriculture durable » [1]. Les solutions avancées, à la fois plus radicales et plus prospectives, commencent seulement à voir le jour ; elles visent la révision des systèmes de culture dans le sens d'une extensification et d'un aménagement adapté de l'espace.

## Une meilleure gestion du cycle de l'azote

Les différentes recommandations qui sont faites dans ce cadre (ajustement et fractionnement des apports d'azote, meilleure valorisation des résidus de récolte, implantation de cultures intermédiaires pièges à nitrates) sont en fait complémentaires les unes des autres. En effet, dans la majeure partie des cas et notamment en monoculture de maïs sur sols filtrants, si l'on veut effectivement réduire les risques de pollution, ce n'est pas une seule de ces recommandations qui doit être mise en œuvre, mais bien l'ensemble de celles-ci.

### Encadré 1

## La méthode du bilan prévisionnel

La méthode du bilan prévisionnel, testée depuis près de 25 ans en France [15, 16] consiste à calculer la quantité d'engrais à apporter en comparant les besoins de la culture aux fournitures.

Ainsi,  $X = (b \cdot Y + R_f) - (R_h + M_h + M_r + M_a)$ ,

avec :

X = quantité d'engrais azoté nécessaire ;

b = azote absorbé par unité de rendement ;

Y = rendement objectif de la culture ;

R<sub>f</sub> = reliquat d'azote minéral à la fin de la campagne ;

R<sub>h</sub> = reliquat d'azote minéral à la fin de l'hiver ;

M<sub>h</sub> = minéralisation nette de l'humus du sol ;

M<sub>r</sub> = minéralisation nette des résidus de récolte du précédent cultural ;

M<sub>a</sub> = minéralisation nette des amendements organiques.

Des essais conduits en Alsace-Lorraine en culture de maïs, notamment sur des parcelles témoins zéro azote, ont permis de proposer une écriture simplifiée de cette équation [21] :

$X = (b \cdot Y - N_s) / CAU$ ,

où :

N<sub>s</sub> = azote fourni par le sol et absorbé par une culture non fertilisée ;

CAU = coefficient apparent d'utilisation de l'engrais.

### The balance-sheet method

## Raisonner le niveau de fertilisation azotée

La recommandation la plus évidente consiste à ajuster au mieux la dose d'engrais azoté en s'appuyant sur la méthode du bilan prévisionnel [15, 16] (encadré 1) qui ne doit pas être confondue avec les différents bilans d'azote à la parcelle ou à l'exploitation, comme par exemple, la méthode Bascule [17]. Le rôle de ces bilans n'est pas de gérer la fertilisation, mais d'apprécier les risques de pollution nitrique encourus et d'évaluer l'impact des pratiques agricoles sur les fuites de nitrates.

Les principaux problèmes rencontrés lors de la mise en œuvre de cette méthode sont dus à la difficulté d'estimer le rendement objectif, les fournitures des engrais de ferme et celles du sol.

En effet, il s'avère très difficile pour les agriculteurs de se donner un objectif de rendement pertinent. L'enquête réalisée pour le compte du Comifer [18] met en évidence que les objectifs de rendement des agriculteurs sont souvent plus élevés que les meilleurs rendements atteints les années antérieures et qu'ils sont rarement remis en

cause au vu de l'évolution de la végétation en cours de cycle. On propose donc de substituer au rendement maximum recherché par les agriculteurs le rendement le plus fréquent dans la région (ou mieux sur la parcelle) et, plus précisément, le rendement accessible deux années sur cinq [19]. Cette même enquête relate que les agriculteurs négligent fréquemment les apports d'azote par les engrais de ferme, ce qui les conduit à viser involontairement un rendement inaccessible et donc à accroître considérablement les risques de pollution. Une meilleure prise en compte des apports d'azote sous cette forme est indispensable ; dans certaines situations, l'interdiction d'épandre les déjections animales serait même souhaitable [10].

Prévoir la disponibilité en azote minéral du sol au cours du temps (qui est fonction du précédent cultural, de la gestion des résidus de récolte...) nécessiterait des mesures fines, réalisées sur des pas de temps courts pour quantifier les phénomènes de minéralisation, d'organisation et de transfert de l'azote. Dans un contexte de mesures limitées, Mached [20] propose de privilégier les profils d'azote minéral en sortie d'hiver parce qu'ils constituent des éléments détermi-

nants pour l'ajustement de la fertilisation azotée. Et, dans la mesure où le reliquat de fin d'hiver constitue le premier facteur explicatif du rendement d'une céréale pour une parcelle témoin sans azote, les résultats obtenus sur les parcelles zéro azote s'avèrent de bons indicateurs des fournitures du sol.

Ceci a ouvert la voie à une écriture simplifiée de la méthode du bilan qui s'appuie sur les résultats de ces parcelles [21] (*encadré 1*). Malgré tout, certaines difficultés demeurent : la fixation de l'objectif de rendement reste problématique ; le coefficient d'absorption d'azote par unité de rendement, longtemps considéré comme fixe (2,3 kg d'azote par quintal de maïs), s'avère variable, d'autant plus faible que le potentiel de rendement serait élevé ; le coefficient apparent d'utilisation de l'engrais, le plus souvent inférieur à 1 du fait que la culture n'utilise jamais la totalité de l'azote apporté au sol, varie fortement, sans qu'il soit toujours possible d'expliquer pourquoi.

Bien que sa mise en œuvre soit délicate, la méthode du bilan prévisionnel constitue un outil indispensable d'aide à la décision, surtout en culture de maïs où les possibilités de réduction de la fertilisation azotée paraissent importantes. Cependant, cette méthode comporte des limites. Elle s'avère peu précise pour certains milieux (sols hydromorphes) et lorsque les apports organiques sont importants [22]. Il faudrait pouvoir l'étendre à une période plus longue que le seul cycle végétatif de la culture, car ce n'est pas seulement la fertilisation azotée de la culture en place qui détermine les pertes d'azote, mais le système cultural avec des périodes d'interculture plus ou moins longues [23].

En effet, il faut noter que, dans la majeure partie des cas, l'ajustement de la fertilisation azotée ne suffit pas pour réduire la pollution. Pour les sols filtrants, la quantité d'azote minéral présente à une date donnée ne permet pas de prédire ce qui sera utilisable ultérieurement par la culture, il n'y a donc guère d'autres moyens que de fractionner les apports. En outre, dans la mesure où certains termes de la méthode du bilan (rendement, minéralisation d'azote endogène...) sont en relation avec les facteurs climatiques qui ne sont pas maîtrisables, il existe toujours un risque d'avoir des reliquats d'azote après culture [24]. Ces reliquats augmentent, notamment quand le rendement obtenu est inférieur à

l'objectif fixé, et il faut alors envisager l'implantation d'une culture intermédiaire piège à nitrates pour corriger cet aléa.

## Fractionner les apports d'azote

Le rythme d'absorption de l'azote par le maïs présente trois phases d'intensité différente : faible jusqu'au stade 10 feuilles (moins de 10 % du total absorbé), très forte du stade 10 feuilles à la floraison (60 à 70 % du total absorbé), modéré pendant le remplissage du grain (20 à 30 % du total) [22]. Ce constat ouvre la voie à deux solutions : retarder le plus possible la nitrification (transformation de l'azote ammoniacal peu mobile en azote nitrique lessivable) en utilisant des engrais ammoniacaux ou uréiques et des inhibiteurs de nitrification, ou fractionner le plus possible les apports d'engrais. Les techniques pour retarder la nitrification présentent des limites. La nitrification résulte d'abord et avant tout d'actions microbiennes qui sont soumises aux conditions de température, d'humectation et d'aération du sol sur lesquelles les engrais, quelle que soit leur forme,

n'ont aucun pouvoir. Les inhibiteurs qui freinent l'activité des bactéries nitrifiantes, ont, pour l'heure, une action trop brève [25]. En outre, ils ne maîtrisent pas totalement la nitrification dont le synchronisme avec les besoins de la plante reste tributaire des conditions du milieu qui sont aléatoires. De plus, il est difficile d'éviter une libération brutale de l'azote, au lieu d'une nitrification progressive [26].

Dans certains cas, le fractionnement de l'azote paraît donc incontournable. En maïs et sur sols profonds, il n'est pas indispensable du fait de la quasi-absence de pertes d'azote [22]. En revanche, dans les sols superficiels, en cas de fortes pluies ou d'irrigation mal maîtrisée, le fractionnement constitue un bon moyen de limiter la percolation des nitrates. Sur sols filtrants, il paraît particulièrement nécessaire en culture irriguée, où l'apport de la totalité de l'azote au semis présente un risque de perte par lessivage.

Toutefois, le fractionnement dépassant deux apports, tel qu'on pourrait le réaliser avec l'irrigation fertilisante, ne semble pas présenter un intérêt évident en culture de maïs. Lors d'une douzaine d'essais réalisés en France de 1986 à 1989 par l'AGPM, l'INRA et l'ITCF, la quantité de nitrates présents dans le sol après la récolte du maïs était plus élevée dans le

### Summary

#### Agronomic solutions to nitrogen pollution

A. Lacroix

*In this paper, the author looks at solutions agronomists have provided farmers for reducing nitrate pollution. By examining various agronomists' studies, it appears that solutions fall into two approaches. The first, which is more extensively used, operates without major technical change and functions by simple modifications to intensive agriculture (adjusting nitrogen fertilisation by the balance-sheet method and using several dressings of fertiliser, management of inter-seasonal cropping), yet this will only restore water quality in the short term. The second has been less explored and aims at changing present agricultural techniques through a holistic and spatial approach (changing crop management sequences or arable systems, integrated farming systems) in order to develop a sustainable agriculture. In both cases, the farmers have to change their present cultural practices; this requires a lot to be learned, in terms of techniques and organisation, and costs money.*

*Cahiers Agricultures 1995 ; 4 : 333-42*

cas d'apports fortement fractionnés [27]. Ces essais ont tous été réalisés avec des doses d'azote raisonnées assez élevées ; peut-être le fractionnement en trois ou quatre fois permettrait-il de tirer meilleur parti de doses réduites d'engrais [28].

Des essais en cases lysimétriques mettent en évidence qu'une répartition des applications d'azote sur maïs (1/3 de la fumure selon la technique agricole classique, 1/3 lors de l'apparition de la panicule mâle, 1/3 au stade de la fécondation par fertirrigation) permet une réduction des pertes hivernales de nitrates pendant l'interculture [29]. Toutefois, cette répartition des apports entraîne des conséquences négatives au niveau de la production et les lixiviations ne sont pas annulées lorsque l'apport d'azote est très élevé.

Plutôt qu'un fractionnement systématique de doses théoriques, définies *a priori*, on peut envisager de faire des apports en fonction de l'assimilation de l'azote par la plante telle qu'elle peut être appréciée par la méthode Jubil qui mesure la teneur en nitrates des tiges. Cette méthode, d'abord testée sur blé [30], permet d'économiser en moyenne 20 kilogrammes d'azote par hectare sans perte de rendement et de réduire significativement la quantité d'azote minéral restant dans le sol à la récolte. Elle a été ensuite évaluée sur le maïs [31] où elle s'avère l'outil le plus pertinent pour diagnostiquer une déficience azotée : elle permet un gain de temps de 7 à 28 jours sur les autres tests disponibles et est très pratique à utiliser. Mais elle reste difficilement exploitable sur maïs, car, selon les essais réalisés dans le Sud-Ouest, elle ne fournit une réponse qu'à partir du stade 15-18 feuilles, période où il devient malaisé d'intervenir dans la parcelle.

Dans l'état actuel de la recherche, l'ITCF et l'AGPM préconisent un premier apport de 50 kilogrammes d'azote par hectare au semis et le complément au stade 8-10 feuilles, avant que les besoins en azote ne deviennent très importants. En culture sèche, le deuxième apport doit être obligatoirement enfoui dans l'interligne, du fait d'un risque de mauvaise utilisation de l'azote s'il ne pleut pas ensuite.

Pourtant, le fractionnement et l'ajustement des apports d'azote s'avèrent insuffisants pour annuler le risque de pollution nitrique. Dans la majeure partie des cas, notamment lorsque la proportion de cultures de printemps dans l'assolement est importante et dans le cas de sols fil-

#### Encadré 2

### Recommandations pour implanter une culture intermédiaire piège à nitrates [38]

- Sans analyse des reliquats d'azote après récolte et en l'absence d'accidents physiologiques, un engrais vert est nécessaire lorsque, en maïs ou blé, le rendement obtenu est inférieur de 8-10 quintaux par hectare à l'objectif de rendement retenu lors du calcul de la dose d'azote à apporter (ce qui correspond approximativement à 20-30 kg d'azote, auxquels il faut ajouter la minéralisation de l'humus après récolte).
- Les cruciféracées, et plus particulièrement la moutarde qui est l'espèce la moins chère, sont conseillées. Le semis de ray-grass sous maïs donne de bons résultats dans le Sud-Ouest de la France ; cette technique est en cours d'expérimentation en Allemagne et en Alsace (chambre d'agriculture).
- La date du semis (sachant que le semis direct sur déchaumage est à privilégier) doit être fixée en fonction de la pluviométrie de la région considérée. Des essais à l'Inra de Colmar montrent qu'un semis fin-août permet facilement d'obtenir fin octobre une production de 3,5 à 4 tonnes de matière sèche à l'hectare correspondant à un prélèvement de 50-60 kilogrammes d'azote.
- La date d'enfouissement doit être bien raisonnée. En effet, un labour précoce est favorable à l'implantation de la culture suivante, au remplissage hydrique maïs, selon les températures hivernales, il peut entraîner des risques de lessivage du fait du début de minéralisation de l'engrais vert. En Alsace, un enfouissement vers le 10 décembre semble un bon compromis : le gel peut émietter le labour et, d'après les premiers essais, la moutarde enfouie à cette date libère peu d'azote au cours de l'hiver.

#### Recommandations for setting up an intermediate nitrogen-trapping crop

trants ou superficiels, il est nécessaire de maîtriser aussi l'azote durant l'interculture [32]. La minéralisation d'automne est un processus naturel, inévitable, qui n'est que peu influencé par la fertilisation de la culture précédente ; il est quantitativement important et suffisant à lui seul pour engendrer une pollution nitrique.

## Gérer l'interculture

Gérer l'interculture consiste à mettre en œuvre les techniques permettant de limiter la quantité de nitrates dans le sol à la reprise du drainage. Une première technique est de mieux valoriser les résidus de récolte (pailles, cannes...). Il s'agit, au cours du processus de décomposition de ces résidus, de valoriser le potentiel de blocage de l'azote minéral sous forme organique par les micro-organismes du sol. Dans le cas du maïs, le Corpen recommande de bannir le brûlage des cannes, de limiter leur exportation et de procéder à leur enfouissement [33].

La vitesse de décomposition des résidus et la dynamique de l'azote qui lui est associée sont extrêmement variables selon les caractéristiques du sol, la température, la teneur en eau, le contact sol-résidu, les techniques culturales (date et mode d'incorporation)... [34]. Cette décomposition doit, au même titre que la fertilisation azotée, se piloter si l'on veut en tirer des effets positifs quant à la gestion de l'azote dans le système de culture. Ainsi, il faut améliorer les itinéraires techniques actuels, notamment pour rechercher une décomposition maximale avant l'hiver, afin de bloquer le maximum de nitrates en surface avant leur migration en profondeur, lors de la reprise des phénomènes de transfert.

Les résidus de récolte pourraient probablement être mieux valorisés dans leur capacité à piéger les nitrates du sol. Cependant, les modalités optimales de gestion de ces résidus (type de broyage, mode et date d'incorporation au sol...) demandent à être précisées.

Une deuxième technique consiste à installer des cultures intermédiaires pièges à

nitrate, distinctes des engrais verts qui, eux, peuvent remplir plusieurs fonctions : effet azote, protection du sol (notamment contre l'érosion éolienne), fonction antagoniste de parasites, amélioration de la portance des sols, amélioration de la structure des sols... [33]. Les cultures intermédiaires pièges à nitrates constituent un moyen efficace pour empêcher le lessivage des nitrates restant dans le sol après la récolte. Elles satisfont leurs besoins d'azote à partir de l'azote minéral du sol et consommation de l'eau, ce qui réduit le drainage (eau) et donc le lessivage [35]. Une culture intermédiaire (blé d'hiver, colza d'hiver ou ray-grass d'Italie) après maïs annule toute lixiviation polluante due aux nitrates ; son implantation peut ne pas affecter la production de maïs et, même, avoir un effet favorable [29]. En monoculture de maïs (dans les sols légers du Sud-Ouest atlantique), l'enfouissement répété d'un ray-grass d'Italie en culture intermédiaire d'hiver exerce une action bénéfique sur le rendement, probablement du fait d'une amélioration du statut organique du sol (stabilité structurale et capacité de rétention en eau) [36]. De plus, le semis direct du maïs dans un « mulch » de ray-grass limiterait considérablement les phénomènes d'érosion éolienne [37]. L'effet bénéfique des cultures intermédiaires sur les fuites de nitrates dépend beaucoup des conditions de leur conduite : choix des espèces, modalités d'implantation, d'enfouissement... [38] (encadré 2). Dans des essais où la disponibilité en azote est de 85 kg/ha, la capacité des espèces à prélever l'azote est la même pour le colza, la moutarde et le radis ; à 150 kg/ha, le colza s'avère apte à prélever davantage que le radis et la moutarde [24]. Les légumineuses (pois, vesce...) sont en général déconseillées parce qu'elles présentent des risques de pertes en nitrates très élevées [32]. Toutefois, la luzerne prélève l'essentiel de l'azote minéral présent dans le sol et, contrairement à ce qui est admis, son retournement n'entraînerait pas une libération intertempore d'azote minéral mais une libération progressive sur plusieurs années [39]. La conduite des cultures intermédiaires est primordiale aussi parce qu'elle peut avoir un effet nuisible pour la culture suivante du fait d'une concurrence par rapport à l'eau (épuisement de la réserve hydrique) ou à l'azote (un enfouissement tardif peut provoquer une forte réorganisation de l'azote minéral et ainsi nuire à la nutrition azotée de la culture suivante).

te). En dehors de situations exceptionnelles, on n'a pas intérêt à rechercher le maximum de production de matière sèche maïs, plutôt, à adapter ce niveau de production à un objectif d'azote minéral à mobiliser et à un objectif de consommation d'eau (300 à 400 l/kg de MS produite) [13, 40].

Mais l'enfouissement des résidus et l'implantation d'une culture intermédiaire ne sont que des moyens de différer, dans le temps, la présence d'azote minéral dans le sol. Il faut donc se préoccuper de la gestion ultérieure de cet azote ainsi stocké, dont la culture suivante n'utilise qu'une faible proportion : dans une rotation blé-betterave, une culture intermédiaire de moutarde restitue 34 % de l'azote mobilisé, les résidus d'une culture de seigle n'en restituent que 9 %. Au cours de la décomposition, une grande partie de l'azote des résidus ou de la culture intermédiaire se trouve assimilée par la microflore du sol ; cette partie se minéralisera au cours des années suivantes et cet azote minéral devra être déduit des apports de fertilisants. La pratique systématique de cultures intermédiaires risque d'accroître, à terme, la minéralisation et la vitesse de renouvellement dans le cycle interne de l'azote ; elle pourrait donc constituer un élément de plus d'intensification [13].

En somme, ces différentes recommandations pour mieux gérer l'azote ne permettraient de limiter la pollution nitrique que ponctuellement et ne résoudraient pas le problème dans le moyen et le long terme. Des solutions plus systématiques devraient donc être envisagées dans une perspective d'agriculture durable.

## Une gestion des agro-écosystèmes

Au sein de la recherche agronomique, une approche systémique se formalise peu à peu à partir du bilan des conduites de cultures pratiquées au cours des trente ou quarante dernières années. Elle part du constat qu'on ne gère pas mieux un système de culture [41] (encadré 3) en lui appliquant successivement une série de techniques, aussi sophistiquées soient-elles, car le système de culture est un système complexe, avec de nombreuses interactions dont il faut tenir compte. Cette approche est systématisée dans les recherches et expérimentations autour de la notion de « production intégrée » qui repose sur la valorisation des potentialités locales des agro-écosystèmes [42] (encadré 3) et un réaménagement de l'occupation de l'espace.

## De la prise en compte des systèmes de culture...

Du fait de la complexité des systèmes de culture et des nombreuses interactions qui les structurent, les recommandations pour réduire la pollution nitrique qui s'attaquent directement à la gestion de l'azote se révèlent insuffisantes car, à regarder de plus près, d'autres aspects du système de culture contribueraient à cette pollution.

### Encadré 3

#### Définitions

**Système de culture** [41] : ensemble des modalités techniques mises en œuvre sur des parcelles traitées de manière identique. Chaque système de culture se définit par :

- la nature des cultures et leur ordre de succession ;
- les itinéraires techniques appliqués à ces différentes cultures, ce qui inclut le choix des variétés pour les cultures retenues.

**Agro-écosystème** (agrosystème) [42] : ensemble des écosystèmes constitués par les divers types de cultures herbacées ou arbustives et, de façon plus générale, des divers milieux naturels modifiés par l'homme pour les utiliser à des fins de culture ou d'élevage intensif.

#### Définitions

Ainsi, de fortes doses de triazine (simazine, atrazine) pourraient accélérer le lessivage en freinant l'activité des micro-organismes dans l'organisation et la minéralisation de l'azote [43]. Ceci constituerait un réel problème en culture de maïs, car celui-ci, plus que d'autres cultures, tolère de fortes doses de produits phyto-sanitaires [44].

Certains modes de travail du sol tendraient à accroître la minéralisation et limiteraient l'exploration racinaire qui constitue une condition déterminante de la nutrition azotée. Certains auteurs suggèrent une interaction positive entre la réduction du volume de sol travaillé et les risques de fuites de nitrates [45] ; une telle réduction interférerait sur les transformations de l'azote dans le sol : forte réorganisation en surface, dénitrification des engrais plus importante. En revanche, d'autres auteurs mettent en évidence qu'il n'existe pas de liaison significative du type de travail du sol effectué à la récolte avec le niveau de minéralisation à l'automne, ni avec le lessivage potentiel [46].

Dans ce débat ouvert sur l'utilité de la simplification du travail du sol pour réduire les fuites de nitrates, plusieurs mises en garde ont été faites. Les conditions de travail d'une culture simplifiée (humidité du sol, notamment) et leurs effets sur l'état structural du sol paraissent déterminants [10]. La répétition des techniques simplifiées sur une même parcelle modifie la flore adventice avec un développement des espèces vivaces ; aussi, les herbicides utilisés devront-ils être adaptés et le dosage sans doute accru [19]. Le travail minimum des sols pourrait favoriser le développement de la pyrale du maïs [44].

Un autre débat concerne le rôle de l'irrigation dans le processus de pollution azotée. Au-delà des problèmes de conduite de l'irrigation par les agriculteurs (souvent réalisée en fonction des risques pour la culture et non pas en fonction de ses besoins), il s'agit de savoir si celle-ci participe ou non à ce processus. En régularisant la production, l'irrigation permet *a priori* de réduire les risques de pollution par rapport à la culture non irriguée. Mais, en fait, elle encourage les cultures de printemps qui laissent le sol nu l'hiver, ce qui constitue un facteur de risque de lessivage. En outre, en permettant une augmentation des potentialités, notamment par un accroissement de la densité de semis de maïs, elle a pour effet indirect d'accroître

les quantités de matière organique du sol [10]. En outre, elle conduit à une minéralisation de l'azote plus importante, du fait des alternances humectation-dessiccation [22].

À partir de telles interrogations, peu à peu s'est forgée l'idée selon laquelle plutôt que d'aménager les systèmes de culture point par point, il vaudrait mieux les remettre en cause dans leur ensemble. Cette idée est d'ailleurs encouragée par le nouveau contexte économique.

Les systèmes de culture actuels ont été sélectionnés et orientés selon le seul critère du rendement puisque, dans la phase de croissance de l'agriculture, ce critère pouvait se confondre avec celui de la rentabilité économique. En effet, compte tenu du soutien des prix des produits agricoles et de la garantie de débouchés que cela représente, les résultats économiques étaient alors proportionnels aux quantités produites.

Aujourd'hui, la donne économique est partiellement modifiée : les débouchés sont saturés, les prix baissent et devraient rejoindre peu à peu le niveau de ceux du marché mondial, les aides accordées sont découplées des quantités produites. Dans ce nouveau contexte, la marge à l'hectare constitue un bien meilleur critère de rentabilité que le rendement. En outre, la recherche d'une agriculture moins polluante pour les eaux superficielles et souterraines nécessite d'ajouter un nouveau critère d'évaluation des systèmes de culture : le risque de fuites de nitrates. Alors que l'agriculture n'a jamais contrôlé ses sorties, l'introduction d'un critère environnemental constituerait une réelle nouveauté, et c'est bien sur ce point que se focalisent actuellement les oppositions de la profession agricole [2].

Il conviendrait donc de « produire autrement » [47], de concilier des exigences d'ordre économique et d'ordre écologique, c'est-à-dire de promouvoir des systèmes de production agricole qui soient rentables économiquement, moins polluants et plus respectueux des écosystèmes. La révision de l'ensemble de l'itinéraire technique s'appuie sur l'hypothèse qu'il est possible, sur le plan économique, d'accepter des objectifs de rendement inférieurs aux potentialités agricoles si cela s'accompagne d'une réduction substantielle des niveaux des différents intrants. Afin que cette économie d'intrants ne se traduise pas par une grande variabilité du résultat économique, d'autres méthodes de limitation des risques phytosanitaires ou de stress

nutritionnel doivent être mises en œuvre, notamment en valorisant mieux les interactions entre techniques culturales, milieu et peuplement végétal.

Cette proposition rejoint celle de l'*Office of Technology Assessment* du Congrès américain qui, après avoir examiné les différentes solutions pour réduire la pollution des eaux par les nitrates et les pesticides, préconise de développer les recherches qui visent une meilleure valorisation de la dynamique des écosystèmes et des interactions entre leurs différents éléments (notamment eau, sol, plante, fertilisants et pesticides) [48].

Malheureusement, peu de recherches sont effectuées en France dans ce sens : en 1990, moins de 5 % des agronomes de l'Inra travaillaient sur les systèmes de culture [49]. Ce « quasi-désengagement » est imputable à deux niveaux de difficultés qui se renforcent mutuellement : la difficulté personnelle des chercheurs à échapper à des stratégies de minimisation des risques intellectuels, financiers et de marginalisation ; la difficulté culturelle à concevoir des méthodes de recherche de synthèse et donc à organiser des programmes pluri-disciplinaires sur le long terme.

Cette problématique a été initiée en 1970 par des recherches en arboriculture sur ce qu'il convient d'appeler la lutte intégrée. Face à l'utilisation massive et systématique des produits phyto-sanitaires en verger, des agronomes et des zoologistes ont suggéré de combiner des pesticides (choisis en fonction de leur moindre incidence écologique et du risque réel encouru par la culture) à des procédés de lutte biologique (emploi d'auxiliaires). Par la suite, l'association de mesures phyto-techniques (conduite des arbres, nutrition...) conduisit à la notion de protection intégrée [50].

Peu à peu, cette démarche s'est élargie à d'autres systèmes de culture, notamment les légumes et les céréales. Aux États-Unis, l'USDA a lancé en 1990 un programme intitulé *Integrated Crop Management* qui vise à aider financièrement les producteurs expérimentant des pratiques de fertilisation et de lutte intégrée en céréales. En France, les travaux de Meynard [51] comparent deux itinéraires techniques de la culture du blé : l'un se situe dans l'optique de l'intensification, l'autre dans celle d'une extensification raisonnée en se donnant pour objectif une réduction du rendement de l'ordre de quinze quintaux par hectare, associée à une réduction plus que proportionnelle

des charges (diminution des engrais, des régulateurs de croissance, des fongicides et de la densité de peuplement) grâce à l'association de variétés différentes, complémentaires du point de vue de leur résistance aux maladies foliaires. Il en résulte que les marges brutes obtenues à l'hectare dans les deux cas sont relativement proches ; mais au fur et à mesure que le prix du blé baisse, l'écart se creuse au profit de l'itinéraire d'extensification. De plus, cet itinéraire valorise mieux l'azote apporté et donc réduit les risques de pollution nitrique.

En ce qui concerne le maïs, le changement d'itinéraire technique semble moins évident : un cycle végétatif plus court dissuaderait de prendre des risques en début de culture, car les aléas ne pourraient être corrigés que difficilement par la suite. Quelques principes ont été esquissés pour une production intégrée du maïs (notamment pour la protection contre la pyrale), mais on est encore loin d'un itinéraire technique construit [44]. Des travaux menés sur le bassin hydrologique de Vittel pour réduire la pollution azotée proposent de réduire sensiblement la place du maïs dans les rotations culturales et, de proche en proche, de réviser l'ensemble du système de production, notamment les systèmes de culture à la base de l'alimentation animale et la gestion des effluents d'élevage [52].

En fait, les recherches menées à l'échelle du système de culture débouchent sur la nécessité d'une approche holistique du système de production et donnent naissance à un concept plus général de production ou agriculture intégrée (*integrated farming systems*) qui prend l'ensemble de l'exploitation comme unité de base.

## ... à une agriculture intégrée

L'agriculture intégrée vise à utiliser les ressources et les mécanismes de régulation naturels pour réduire au maximum les intrants afin, à la fois, de diminuer les impacts négatifs sur l'environnement et de maintenir le revenu agricole [53]. Les principes de cette démarche sont : approche holistique, diversité des situations, complémentarité des productions, rôle moteur des agro-écosystèmes... Il ne s'agit pas d'une « révolution technique » mais plutôt d'une réflexion moderne sur les façons de gérer au mieux les agrosys-

tèmes [54]. L'agriculture intégrée consiste à combiner des techniques classiques, parmi lesquelles la rotation des cultures joue un rôle central, et des techniques modernes, entre autres la sélection et la culture de variétés résistantes qui s'avèrent essentielles. Ces techniques sont adaptées les unes par rapport aux autres et en fonction du type de culture, du type de sol et du climat.

En Europe, les premiers résultats des expérimentations réalisées en grande culture [54, 55] mettent en évidence que, par rapport au système conventionnel, le système de production intégrée conduit à des rendements plus faibles, mais que l'économie d'intrants qu'il permet de réaliser compense suffisamment la diminution des recettes. En outre, les bilans entre apports et exportations d'azote y sont plus favorables. Cette comparaison devrait être systématisée dans le cadre d'un programme de l'Union Européenne *Competitiveness of Agriculture and Management of Agricultural Resources* qui porte sur un réseau d'essais effectués dans dix pays d'Europe.

Aux États-Unis, des expérimentations du même type sont menées dans le cadre d'un programme de l'USDA nommé Lisa (*Low Input Sustainable Agriculture*). Les premiers résultats convergent avec les conclusions européennes [56] mais sont critiqués. Les américains mettent en doute la réalité même de la diminution des intrants ; ils insistent sur l'accroissement d'une nouvelle catégorie d'*inputs*, à savoir l'information, la gestion technique et économique (*information and management inputs*) qui viennent se substituer en partie aux *inputs* achetés du système conventionnel. Ils mettent ainsi en évidence toute la difficulté de la production intégrée qui tient au fait que les techniques mises en œuvre demandent une plus grande technicité que celles de l'agriculture intensive, car chaque milieu est un cas particulier qu'il faut observer avec précision pour le maîtriser. Parce que, aujourd'hui, la maîtrise des techniques utilisées est encore insuffisante, les résultats s'avèrent d'une grande variabilité d'une année sur l'autre. Avant que ce type de production ne soit proposé aux agriculteurs, des recherches complémentaires sont donc nécessaires pour affiner les connaissances.

Mais au-delà de ces considérations techniques, il faut bien voir que la gestion de l'occupation de l'espace occupe une place essentielle dans la production intégrée.

## ... à une gestion de l'occupation de l'espace agricole et rural

La gestion de l'occupation de l'espace intervient à deux niveaux : la répartition spatiale des systèmes de culture (qui est fonction non seulement des potentialités du milieu mais aussi de sa fragilité écologique) et l'instauration de surfaces de compensation écologique (haies, biotopes naturels, fossés...) dont le rôle est d'entretenir la diversité biologique, notamment de maintenir les populations d'auxiliaires.

À travers cette double préoccupation, on rejoint ainsi les recommandations issues d'autres recherches qui ne s'inscrivent pas forcément dans une perspective aussi radicale que l'agriculture intégrée. En effet, un réaménagement de l'espace agricole et rural pourrait aussi constituer une solution pour concilier agriculture intensive et eau non polluée.

Des mesures simples et peu coûteuses d'aménagement rural (boisement ou enherbement des berges d'un ruisseau, implantation d'une haie ou d'une prairie), qui valorisent les capacités d'épuration naturelle du milieu, diminuent sensiblement la concentration en nitrates des eaux [57]. Or, ces actions peuvent tirer parti de sites favorables à la réduction de la concentration qui sont souvent très localisés et marginaux pour l'agriculture intensive.

De même, le classement des milieux selon leur niveau de vulnérabilité invite à redistribuer les systèmes de culture en fonction des contraintes liées à l'environnement, mais pas pour autant à bannir les systèmes intensifs. Gilibert [12] propose de remettre en cause l'extension du maïs là où les risques de lessivage des nitrates sont importants et d'y remplacer le maïs fourrage par de la luzerne. Dans les zones où le maïs occasionne des problèmes, non pas de qualité mais de quantité d'eau du fait du recours à l'irrigation, il recommande de remplacer le maïs fourrage par l'ensilage de céréales d'hiver immatures. Mais il sera difficile de détrôner le maïs qui repose sur une dynamique de filière importante et dont la conduite est bien connue des agriculteurs.

Dans certaines zones jugées à risques, plutôt que de supprimer purement et

simplement les cultures réputées polluantes, il peut être envisagé d'en réduire la part en admettant que des fuites nitriques puissent être tolérées sur une parcelle si celle-ci est voisine d'autres qui n'émettent pas de nitrates. De ce point de vue, les jachères imposées par la réforme de la politique agricole commune (PAC) constituent une opportunité. La redéfinition des modalités de cette mise en jachère intervenue en 1994 (sol nu non autorisé, élargissement du gel fixe) pourrait avoir des effets bénéfiques sur l'environnement. En effet, alors que la jachère nue travaillée comporte des risques de lessivage, la jachère avec couvert végétal (spontané ou semé) présente un intérêt évident puisqu'une couverture du sol réduit les risques de pollution des eaux par les nitrates et les pesticides [58]. En outre, la jachère fixe pourrait être mise à profit pour geler des sites présentant un intérêt environnemental (surfaces sensibles des bassins versants, bordures de rivière, bas fonds hydromorphes...). Des simulations de gel de parcelles sensibles dans le bassin de Bruyères attestent de la possibilité de réduire la concentration moyenne de l'eau en nitrates [59].

Cependant, la gestion de l'occupation de l'espace pose un sérieux problème de coordination entre les différents acteurs d'un même territoire. En effet, elle ne peut pas être raisonnée au niveau de la seule exploitation ; elle doit être coordonnée au niveau de l'ensemble du bassin versant où les centres de décision sont dispersés. En outre, elle suppose que le conflit entre l'usage privatif du sol et la volonté collective de sauvegarder la ressource soit résolu, c'est-à-dire que les acteurs acceptent de se soumettre à des règles de répartition spatiale des activités. La loi sur l'eau de 1992 crée une nouvelle structure au niveau des bassins : la commission locale de l'eau qui, de fait, a pour tâche d'effectuer cette coordination lors de l'élaboration du schéma d'aménagement et de gestion des eaux (SAGE). Mais il faudra sans doute attendre des années pour que cette réforme s'inscrive dans les têtes et dans les faits.

## Conclusion

Toutes les expérimentations relatées ci-dessus permettent de réduire les teneurs des eaux en nitrates, mais le problème est de savoir dans quelle mesure elles

peuvent stabiliser ces teneurs dans la durée. Plus précisément, les infléchissements de l'agriculture intensive qui sont proposés sur la gestion de l'azote et de l'espace peuvent-ils préserver la qualité de la ressource en eau à long terme ? Certains travaux [13, 14] mettent en doute une telle perspective mais mériteraient d'être approfondis, notamment pour prévoir l'évolution des matières organiques et de l'azote dans le sol au cours du temps [60].

Les propositions relatives à la notion de production intégrée présentent, de ce point de vue, un réel intérêt : à travers le souci de reproductibilité des agro-écosystèmes, elles se situent d'emblée dans un objectif de long terme. En outre, elles cherchent à traiter l'ensemble des problèmes environnementaux liés à l'agriculture plutôt qu'à promouvoir des solutions au cas par cas (pollution de l'eau par les nitrates, pollution de l'eau par les pesticides, érosion des sols, réduction de la biodiversité, dégradation des paysages...). Mais les expérimentations sont encore trop peu nombreuses pour que le changement d'univers technique qu'elles supposent soit rendu crédible.

En effet, cette deuxième gamme de solutions à la pollution azotée renvoie à un paradigme technico-économique différent du productivisme dans lequel s'inscrit la première série de recommandations. Toutefois, dans les deux cas de figure, on peut noter un certain nombre de convergences dans les modifications que les agriculteurs devraient apporter à la conduite actuelle des cultures :

- la connaissance des potentialités de chaque milieu devient primordiale. Au minimum, une évaluation précise des rendements potentiels permettrait à l'agriculteur d'ajuster ses niveaux d'intrants pour optimiser sa marge brute tout en respectant mieux l'environnement. D'ailleurs, ceci serait d'autant plus nécessaire, en maïs, que la plupart des interventions se situent en début de végétation et qu'il existe peu de possibilités de correction en cours de culture. Mais, au-delà, cette évaluation pourrait ouvrir la voie à une remise en cause de la répartition spatiale actuelle des systèmes de culture, dans la mesure où elle peut mettre en évidence que, localement, certaines cultures ne sont implantées qu'en ayant recours à des techniques qui outrepassent les potentialités du milieu ;

- l'information et la maîtrise technique conditionnent de plus en plus les résul-

tats technico-économiques. En effet, à l'avenir, les agriculteurs devraient user de beaucoup de capacité d'observation, d'analyse et de précision pour adapter localement les techniques. Dans le cadre de la production intégrée, cette exigence est évidente ; mais une meilleure gestion du cycle de l'azote et un aménagement de l'occupation de l'espace vont dans le même sens. Par exemple, pour raisonner le niveau de fertilisation, il faut l'ajuster au niveau de chaque parcelle (voire le différencier au sein de parcelles hétérogènes) et notamment prendre en compte la succession culturale ; pour bien conduire une culture piège à nitrates, il faut optimiser localement sa date d'implantation, sa date de retournement...

En somme, il n'existerait plus de solutions standardisées et la conduite des systèmes de culture nécessiterait de reconsidérer les routines acquises dans le passé. Un processus d'apprentissage technique et organisationnel serait indispensable dans la mesure où les agriculteurs devraient recourir à un savoir-faire absent dans le cadre de la conduite productiviste des cultures. De ce point de vue, les infléchissements de cette conduite, qui visent une meilleure gestion du cycle de l'azote, peuvent constituer un premier pas vers une agriculture durable. En cherchant à piloter le cycle de l'azote, on s'aperçoit qu'il existe toutes sortes d'interactions entre celui-ci et le cycle de l'eau, le travail du sol... et, de proche en proche, on est amené à modifier les techniques culturales et les systèmes de culture. Il existerait donc une trajectoire technologique continue conduisant des simples aménagements du productivisme (soutenable faible) à un changement radical de la manière de produire (soutenable forte).

Outre l'importance du processus d'apprentissage, le problème réside dans le fait que la prise en compte de l'environnement ne semble pas compatible avec les conditions de prix et de concurrence que connaît l'agriculture actuellement. En effet, la mise en œuvre des recommandations pour réduire la pollution azotée pose problème aux agriculteurs car, pour l'heure, elle engendre des coûts supplémentaires. Certes, le raisonnement de la fertilisation peut, dans la majeure partie des cas, être à l'origine d'une réduction des coûts puisque les agriculteurs ont une nette tendance à la surfertilisation. Cette réduction reste néanmoins

limitée: pour les agriculteurs chez qui nous avons enquêté dans la plaine de Bièvre (La Côte-Saint-André, Isère), nous avons estimé cette économie potentielle à 130 francs par hectare de maïs irrigué, soit moins de 3 % de la marge brute réalisée. En revanche, les autres préconisations, qu'elles relèvent de la gestion de l'azote ou de l'aménagement rural, accroissent sensiblement les charges. Nos propres évaluations des surcoûts de différents scénarios de moindre pollution en maïs irrigué varient de 557 francs par hectare (implantation d'un blé comme culture intermédiaire) à 1 157 francs par hectare (réduction de l'importance du maïs dans la rotation culturale) [7].

Au-delà de ces surcoûts facilement identifiables, la mise en œuvre de telles recommandations engendre inévitablement un temps de travail supplémentaire: recherche de références locales, ajustement au fonctionnement de l'exploitation, surveillance des systèmes de culture... Le temps consacré par les agriculteurs à la prise de décision et au suivi des cultures augmente avec leur niveau de maîtrise technique [61].

Le problème est alors de savoir comment les agriculteurs peuvent être incités à suivre ces recommandations. La réforme de la PAC déstabilise les routines acquises et crée de meilleures conditions pour une diminution de la pollution azotée: la baisse des prix encourage une réduction des intrants, le gel des terres offre des possibilités à valoriser... Mais, cette réforme ne constitue pas, en elle-même, une politique environnementale [2]. Et même, on peut se demander dans quelle mesure la diminution des prix n'entre pas en contradiction avec la prise en charge, par les agriculteurs, des surcoûts mentionnés ci-dessus. Alors, ne faut-il pas envisager d'accompagner et d'inciter les agriculteurs à mettre en œuvre les recommandations agronomiques? La modification du référentiel de prix et, donc, la prise en charge par la société du coût environnemental s'avèrent indispensables. Une politique de préservation de la ressource en eau, fondée sur des instruments économiques (taxation de l'agriculteur pollueur, subvention à l'agriculteur respectueux de l'environnement), pourrait amorcer cette mutation technico-économique [5] ■

## Remerciements

Je remercie vivement les personnes qui m'ont communiqué leurs remarques écrites sur une première version de ce texte: les membres de l'équipe R&A, trois lecteurs anonymes de la revue et différents agronomes, M. Baudrand (Chambre d'agriculture de l'Isère), B. Fabre et Y. Gautronneau (Isara Lyon), J.M. Machet et B. Mary (Inra Laon), P. Morlon (Inra Dijon); je reste néanmoins seule responsable de son contenu.

Le présent travail s'inscrit dans le cadre d'une recherche plus globale, menée par l'équipe régulation et agriculture (R&A, Inra Grenoble), intitulée « Agriculture, environnement et pollution des eaux: une perspective économique » et réalisée pour le compte et avec l'aide du Comité environnement, société et développement à long terme du Programme environnement du Cnrs (nov. 1992-nov. 1994). Cette recherche a donné lieu à la rédaction d'un rapport de synthèse et de six documents [1-7] disponibles à l'adresse ci-dessus.

## Références

- Mollard A, Lacroix A, Bel F, Le Roch C. *Agriculture, environnement et pollution des eaux: une perspective économique*. Grenoble: Inra-Esr, 1994; 27 p + ann.
- Lacroix A, Mollard A. *Agriculture et gestion de l'environnement: du conflit au compromis?* Grenoble: Inra-Esr, 1994; 18 p.
- Lacroix A, Balducci F. *Le traitement des nitrates dans l'eau potable: bilan économique*. Grenoble: Inra-Esr, 1994; 15 p.
- Lacroix A. *Les solutions agronomiques à la pollution azotée: une lecture d'économiste*. Grenoble: Inra-Esr, 1994; 16 p.
- Le Roch C, Mollard A. *Les instruments économiques de réduction de la pollution azotée en grandes cultures*. Grenoble: Inra-Esr, 1994; 21 p.
- Bel F, Le Roch C, Lacroix A, Mollard A. *Une approche empirique de la pollution diffuse d'origine agricole: le cas de La Côte-Saint-André*. Grenoble: Inra-Esr, 1994; 21 p. + ann.
- Bel F, Gautronneau Y. *Scénarios de systèmes de cultures favorables à la réduction de la pollution azotée*. Grenoble: Inra-Esr, Lyon: Isara, 1995; 18 p.
- Vachier P, Dever L. Qualité des eaux de recharge de la nappe et pratiques agricoles en pays de craie. Cas de la Champagne. In: Calvet R, éd. *Nitrates, agriculture, eau*. Versailles: Inra-Editions, 1990; 251-6.
- Kengni L. *Mesure in situ des pertes d'azote sous culture de maïs irriguée: application à la plaine de la Bièvre (Isère)*. Grenoble: Université Joseph Fourier, Thèse de doctorat, 1993; 220 p.
- Sebillotte M, Meynard JM. Systèmes de culture, systèmes d'élevage et pollutions azotées. In: Calvet R, éd. *Nitrates, agriculture, eau*. Versailles: Inra-Editions, 1990; 289-308.
- Zilliox L, Schenck C, Kobus H, Huwe B. Pollution par les nitrates: quels remèdes? *La Recherche* 1990; 227: 18-21.
- Gilibert J. Économie de l'eau et élevage: vers un choix plus régionalisé des espèces fourragères? *Cahiers Agricoles* 1992; 3: 180-8.
- Mary B. Gérer l'interculture pour maîtriser la pollution nitrique. *Journée d'étude Interculture et nitrates*. Corpen-Comifer, 29 janvier 1992; 16 p.
- Addiscott TM, Whitmore AP, Powlson DS. *Farming, fertilizers and the nitrate problem*. Bristol: CAB International, Leaper and Gard Ltd, 1991; 170 p.
- Hébert J. La fumure azotée du blé tendre d'hiver. *BTI* 1969; 244: 755-66.
- Rémy JC. État actuel et perspectives de la mise en œuvre des techniques de prévision de la fumure azotée. *CR Acad Agric Fr* 1981; 67: 859-74.
- Benoît M. Un indicateur des risques de pollution nommé Bascule (Balance azotée spatialisée des systèmes de culture de l'exploitation). *Courr Cell Environ Inra* 1992; 18: 23-8.
- Cerf M, Meynard JM. *Enquête sur la mise en œuvre des méthodes de fertilisation raisonnée*. 3<sup>e</sup> forum de la fertilisation raisonnée. Paris: Éd. Comifer, 1988; 5-12.
- Fabre B, Guglielmi M, Kockmann F, Rabut A. Le coût d'une politique de moindre pollution azotée: application aux exploitations du Val de Saône. *Perspectives Agricoles* 1993; 186: 72-83.
- Machet JM. Pourquoi et quand mesurer l'état minéral du sol en azote? In: Duc P, éd. *L'azote et le soufre dans le sol*. Gif-sur-Yvette: Éditions Frontières, 1991; 151-61.
- Desvignes P, Jacquin F, Koller R, Limaux F. L'application au quart Nord-Est de la France du bilan simplifié. *Perspectives Agricoles* 1994; 191: 31-4.
- Carloti B. *Recueil des bases de préconisation de la fertilisation azotée des cultures*. Paris: Corpen, 1992; 132 p.
- Muller M. Fertilisation azotée des grandes cultures: approche en France. In: *Quelles fertilisations demain?* 1<sup>er</sup> forum européen de la fertilisation raisonnée. Paris: Éd. Comifer, 1991; 179-90.
- Chapot JY. Prélèvement d'azote de différentes espèces d'engrais verts. Estimation sur casés lysimétriques de l'incidence d'un engrais vert sur la réduction du lessivage des nitrates. In: *Nitrates et « engrais verts »*. *Recueil des communications*. Paris: Corpen-Comifer, 1987; 10 p.
- Machet JM, Mary B, Boiffin J. Les aspects agronomiques du problème de la pollution de la nappe phréatique, particulièrement pour les nitrates. *Sucrière Française*, août-septembre 1990; 6-11.
- Thiollet P. Quels sont les engrais qui polluent? *Cultivar* 1990; 276: 26.
- Castillon P. Fractionnement: deux apports sinon rien. *Cultivar* 1990; 276: 33-4.
- AGPM. Un maïs bien conduit ne pollue pas. *Cultivar* 1990; 276: 40.

29. Decau J, Pujol B. Contribution des techniques culturales à la lutte contre la pollution nitrique des nappes phréatiques. *Courr Cell Environ Inra* 1992 ; 18 : 23-8.
30. Juste C. Un nouvel outil pour raisonner l'azote. *Cultivar* 1993 ; 352 : 49-51.
31. Desvignes P, Plenet D. Azote sur maïs : les jus de bas de tiges. *Cultivar* 1994 ; 363 : 49-50.
32. Machet JM, Mary B. Effet de différentes successions culturales sur les risques de pertes de nitrates en région de grande culture. In : Calvet R, éd. *Nitrates, agriculture, eau*. Versailles : Inra-Editions, 1990 ; 395-403.
33. Corpen. *Interculture : gérer l'interculture pour limiter les fuites de nitrates vers les eaux*. Paris : ministères de l'Agriculture et de l'Environnement, 1991 ; 40 p.
34. Recous S, Darwis D, Robin D, Machet JM. Décomposition des résidus de récolte. Interactions avec la dynamique de l'azote. In : *Matières organiques et agricultures*. Paris : Gemas-Comifer, 1993 ; 3-15.
35. Chapot JY. Estimation sur lysimètres de l'incidence de l'introduction d'un engrais vert dans une rotation blé-maïs sur la lixiviation des nitrates. In : Calvet R, éd. *Nitrates, agriculture, eau*. Versailles : Inra-Editions, 1990 ; 411-6.
36. Lubet E, Juste C. Intérêt d'un engrais vert d'hiver en monoculture de maïs dans les sols légers du Sud-Ouest Atlantique. In : *Nitrates et « engrais verts »*. Recueil des communications. Paris : Corpen-Comifer, 1987 ; 7 p.
37. Duchène E, Chapot JY. Engrais verts : quel intérêt ? *Cultivar* 1988 ; 225 : 62-3.
38. Chapot JY. Engrais verts, un moyen pour lutter contre le lessivage des nitrates. *Cultivar* 1989 ; 258 : 100.
39. Muller J, Denys D, Thiébeau P. Présence de légumineuses dans la succession de cultures : luzerne et pois cultivés purs ou en association. Influence sur la dynamique de l'azote. In : *Matières organiques et agricultures*. Paris : Gemas-Comifer, 1993 ; 83-92.
40. Muller JC, Denys D, Morlet G, Mariotti A. Azote minéral après culture : effet des « engrais verts » sur le lessivage et sur l'utilisation par la culture suivante. In : *Nitrates et « engrais verts »*. Recueil des communications. Paris : Corpen-Comifer, 1987 ; 8 p.
41. Sebillotte M. Les systèmes de culture. Réflexion sur l'intérêt et l'emploi de cette notion à partir de l'expérience acquise en région de grande culture. In : *Séminaire du département d'agronomie de l'Inra*. Vichy, 16-18 mars 1982.
42. Ramade F. *Dictionnaire encyclopédique de l'écologie et des sciences de l'environnement*. Paris : Ediscience international, 1993 ; 822 p.
43. Bollag JM, Henminger NM. Influence of pesticides on denitrification in soil and with an isolated bacterium. *J Environ Qual* 1976 ; 5 : 15-8.
44. Moreau JP. La culture du maïs peut-elle faire bon ménage avec l'environnement ? *Cahiers Agricultures* 1992 ; 3 : 189-94.
45. Germon JC, Taureau JC. Simplification du travail du sol et transformation de l'azote : conséquences sur le lessivage des nitrates. *Perspectives Agricoles* 1991 ; 161 : 40-51.
46. Darwis D, Machet JM, Mary B, Recous S. *Effect of straw management on nitrogen soil dynamics and nitrate leaching*. Laon : Inra, 1993 ; 6 p.
47. Meynard JM, Girardin P. Produire autrement. *Courr Cell Environ Inra* 1991 ; 15 : 1-19.
48. Office of Technology Assessment (US Congress). *Beneath the bottom line: agricultural approach to reduce agrichemical contamination of groundwater*. Washington : Government Printing Office, 1990 ; 337 p.
49. Girardin P. Agriculture intégrée et recherche : comment lever les barrières ? *Inra mensuel* 1992 ; 64 : 29-32.
50. Altieri MA, Martin PB, Lewis WJ. A quest for ecologically based pest management systems. *Environment Management* 1983 ; 7 : 91-100.
51. Meynard JM. *Construction d'itinéraires techniques pour la conduite du blé d'hiver*. Paris : Thèse docteur-ingénieur de l'Ina-PG, 1985 ; 258 p. + ann.
52. Deffontaines JP, Benoît M, Brossier J, Chia E, Gras F, Roux M. *Agriculture et qualité des eaux*. Versailles-Dijon-Mirecourt : Inra-Sad, 1993 ; 334 p.
53. El Titi A, Boller EF, Gendrier JP, eds. *Integrated production. Principles and technical guidelines*. Montfavet : IOBC (International Organisation for Biological and Integrated Control) 1993 ; 40 p.
54. Vereijken P, Viaux P. Vers une agriculture « intégrée ». *La Recherche* 1990 ; 227 : 22-5.
55. Viaux P, Lemaître G, Gouet JP, Robert D. Contribution méthodologique à l'étude des systèmes de grande culture. *International symposium Systems-Oriented Research in Agriculture and Rural Development*. Montpellier, 21-25 novembre 1994 ; 13 p.
56. Madden JP, O'Connell P. Early results of the LISA program. *Agricultural libraries information notes*. Beltsville : National Agricultural Library, USDA, 1989, 6/7 : 1-10.
57. Paegelow M, Decroux J, Hubschman J, Puginier M. Des mesures simples d'aménagement rural contre la pollution par les nitrates : l'exemple d'Aurade (Gers, France). In : Calvet R, éd. *Nitrates, agriculture, eau*. Versailles : Inra-Editions, 1990 ; 101-6.
58. Sebillotte M, Allain S, Doré T, Meynard JM. La jachère et ses fonctions agronomiques, économiques et environnementales. *Courr Cell Environ Inra* 1993 ; 20 : 11-22.
59. Mary B, Vigour N, Machet JM. *Effet du changement des pratiques culturales sur le fonctionnement de l'azote d'un bassin d'alimentation*. Paris, Laon : ministère de l'Environnement/Inra, 1992 ; 32 p. + ann.
60. Mary B, Guérif J. Intérêts et limites des modèles de prévision de l'évolution des matières organiques et de l'azote dans le sol. *Cahiers Agricultures* 1994 ; 3 : 247-57.
61. Le Monnier de Gouville E, Viaux P. *Le temps consacré par les agriculteurs à la prise de décision et au suivi technique des cultures*. ITCF/Institut Supérieur Agricole de Beauvais, 1994 ; 91 p.

## Résumé

Dans ce texte, l'auteur analyse les solutions qui peuvent être mises en œuvre par les agriculteurs pour réduire la teneur des eaux en nitrates. Les problématiques agronomiques passées en revue révèlent deux manières différentes d'aborder ce problème. La première, qui fait l'objet de la majeure partie des recherches, consiste à raisonner à univers technique constant et à faire des recommandations applicables immédiatement dans le cadre d'une agriculture très productive : fertilisation raisonnée, fractionnement des apports, gestion de l'interculture. La seconde, encore très minoritaire, opte pour la remise en cause du modèle technique actuel à travers une démarche systémique et spatialisée, dans une perspective d'agriculture durable : changement d'itinéraire technique, de systèmes de culture, production intégrée... Dans l'un et l'autre cas, les modifications à apporter à la conduite actuelle des cultures posent problème aux agriculteurs.