
Évaluation des effets des pratiques agricoles sur les flux d'azote à l'échelle d'un bassin versant d'élevage intensif

Paul Bordenave, Brigitte Orain

Depuis 1960, l'évolution des productions animales en Bretagne est marquée par un double phénomène d'intensification et de densification. Ceci a pour conséquence une consommation accrue d'intrants aussi bien au niveau des élevages que des productions végétales. La production de déjections animales devient ainsi excédentaire par rapport au potentiel de valorisation offert par les surfaces cultivées, ce qui conduit à des pratiques de surfertilisation. Les éléments en excédents sont alors à l'origine de la dégradation des milieux naturels (Jacquin, 1992). En effet, dans cette région, la ressource en eau se dégrade du fait de son enrichissement en nitrates, phosphates et germes bactériens résultant en partie de l'activité agricole. La pression sociale et législative en matière d'environnement pour la protection des ressources en eau, ainsi que les exigences économiques des élevages imposent une gestion optimisée des effluents d'élevage en cohérence avec les surfaces présentes. Dans le cadre du contrat de baie « Rade de Brest », le bassin versant du Kerouallon, affluent de l'Elorn, situé dans le Nord Finistère a été étudié par la Communauté urbaine de Brest, le Cemagref de Rennes, la Chambre d'agriculture et l'établissement départemental de l'élevage (EDE) du Finistère.

Le premier objectif est de réaliser pendant deux années un diagnostic fin basé sur des enregistrements des pratiques agricoles de façon à proposer des modifications argumentées, acceptables par les éleveurs dans le contexte de leur entreprise. Ceci nous a conduit à utiliser et à développer des outils d'analyse et d'aide à la décision pour les

élevages et pour la fertilisation. Pour des raisons de lisibilité, nous avons choisi de ne présenter en détail que le cas des élevages porcins, mais il est bien évident que les élevages bovins ont été pris en compte, aussi bien par leurs rejets épandus que par l'intermédiaire des prairies...

Un deuxième objectif est de voir comment évaluer dans le temps les effets des modifications sur la qualité de l'eau. Nous nous sommes ici intéressés uniquement à l'azote. La mesure des flux et des concentrations à l'exutoire n'est pas suffisante, d'une part parce qu'il est probable que les temps de réponse sont longs et, d'autre part, parce que les variations annuelles induites par le climat risquent d'être plus importantes que celles provenant de la modification des pratiques. La méthode présentée ici est basée sur un suivi et permet de distinguer à terme les trois principaux temps de réaction : celui lié à la modification des pratiques que l'on peut apprécier par l'évolution des bilans parcellaires ; celui lié aux sols pour lequel nous utilisons des mesures sur un échantillon de parcelles complétées par une modélisation des quantités lixivées sous la zone racinaire ; celui lié à l'hydrologie du bassin pour lequel nous proposons également une modélisation des transferts entre les parcelles et l'exutoire.

Kerouallon : un bassin versant agricole en excédent structurel

Situé sur un sous-sol peu perméable constitué par des schistes et quartzites de Plougastel à faible profondeur (50 à 80 cm), le bassin versant a une

**Paul Bordenave
et Brigitte Orain**
Cemagref
Division GERE
17, avenue de
Cucille
35044 Rennes
Cedex

superficie de 6 km² (dont 490 ha de surface agricole utile, ou SAU). Les sols sont majoritairement bruns ou bruns lessivés avec une texture limoneuse prédominante et une teneur en matière organique élevée supérieure à 4 % de la terre fine dans 96 % des 245 parcelles. La structure stable, peu battante, donne une bonne perméabilité jusqu'à l'altérité de schiste. Le chevelu du ruisseau, déjà naturellement important, est encore augmenté par un réseau de fossés bien entretenus, par les chemins qui sont établis directement sur le schiste pour la plupart et par des drainages partiels des zones humides d'amont ou de fond de vallée. Tout ceci, ainsi qu'une pente moyenne relativement élevée, favorise des transferts d'eau et de solutés très rapides (Cann, 1995). L'activité agricole est dominante. L'élevage, présent dans la totalité des 20 exploitations ayant des parcelles sur le bassin, est constitué par une production bovine intensive de lait et de viande (85 % des exploitations) et par une production porcine hors-sol (64 % des cas). La production des parcelles est utilisée essentiellement pour l'alimentation des animaux : 35 % des surfaces sont consacrés aux prairies temporaires, 29 % au maïs fourrage, 23 % aux céréales d'hiver. Du fait de l'importance des élevages hors-sol (porcs principalement et bovins dans une moindre mesure), 44 % de la SAU est occupée par des rotations céréalières de courte durée (2 à 3 ans), sans prairies. La succession de cultures annuelles la plus fréquente est maïs grain (récolté humide) ou maïs ensilage suivi d'un blé tendre, lequel est parfois suivi d'une orge d'hiver. La succession maïs sur maïs est très peu fréquente. C'est donc avant la culture de maïs que les sols restent nus, et non pas après, en raison de la nécessaire rotation des cultures qui alterne des cultures d'hiver et des cultures de printemps. Le bassin est situé dans un canton classé en excédent structurel (ZES : Zone d'excédent structurel correspondant à un canton dont la production d'effluents est supérieure à 170 kg d'azote total par hectare) au sens de la directive nitrates. Le flux d'azote mesuré à l'exutoire pendant la campagne hydrologique 1993-1994 est de 46 tonnes (dont 98 % sous forme de nitrates) équivalent à une perte moyenne de 76 kg/ha. Celui de phosphore total est de 860 kg soit 1,4 kg/ha. Malgré des flux importants, la concentration moyenne des eaux en nitrates (NO₃) à l'exutoire est relativement modérée (de l'ordre de 37 mg/l de nitrates NO₃ en moyenne

annuelle) comparée à d'autres bassins versants en raison d'une pluviosité très élevée (de l'ordre de 1 000 mm/an). Des pointes de concentration supérieures à 50 mg de NO₃/l sont cependant régulièrement mesurées en hiver pendant la période de drainage intense alors que les valeurs minimum de 27 mg de NO₃/l sont trouvées en fin d'été.

Une démarche en trois étapes

L'originalité de notre démarche consiste en l'appréhension des systèmes de production dans leur globalité : l'analyse et la modélisation interviennent, dès l'alimentation des animaux en amont de la production des rejets d'élevage jusqu'à leur valorisation sur les sols et se poursuivent par l'évaluation des flux de nutriments transférés entre les parcelles agricoles et les eaux de surface et souterraines jusqu'à l'exutoire. Comme indiqué en introduction, nous ne présenterons ici en détail que la méthodologie et les résultats concernant les élevages porcins.

■ *DIALSTO porc : un outil d'analyse et de diagnostic de la production des déjections des élevages porcins*

La méthodologie consiste à définir, pour chaque atelier porcin analysé, les quantités et qualités de déjections produites à partir des modes de conduite mis en œuvre, des performances zootechniques réellement observées et des équipements présents (figure 1). Il s'agit ici d'éviter l'utilisation de références qui sont très intéressantes dans les études de groupes ou les traitements statistiques, mais qui ne répondent pas à nos objectifs de définition et d'analyse des processus de production des déjections. De plus elles ne permettent pas d'établir des diagnostics correspondant à la réalité des itinéraires techniques pratiqués dans les exploitations porcines du bassin étudié. Nous avons donc formalisé la filière « production et stockage » de ces produits, puis élaboré un modèle spécifique : DIALSTO porc (Diagnostic sur la production de déjections porcines en fonction de l'alimentation et du stockage). DIALSTO est tout d'abord un outil de gestion et d'aide à la décision qui permet de formuler des propositions d'interventions en vue d'améliorer des pratiques « pénalisantes » vis-à-vis de l'environnement ; de hiérarchiser ces pratiques en fonction des contraintes structurelles, économiques ou

humaines existantes sur l'exploitation, et enfin de simuler des « situations objectifs » regroupant l'ensemble des propositions retenues.

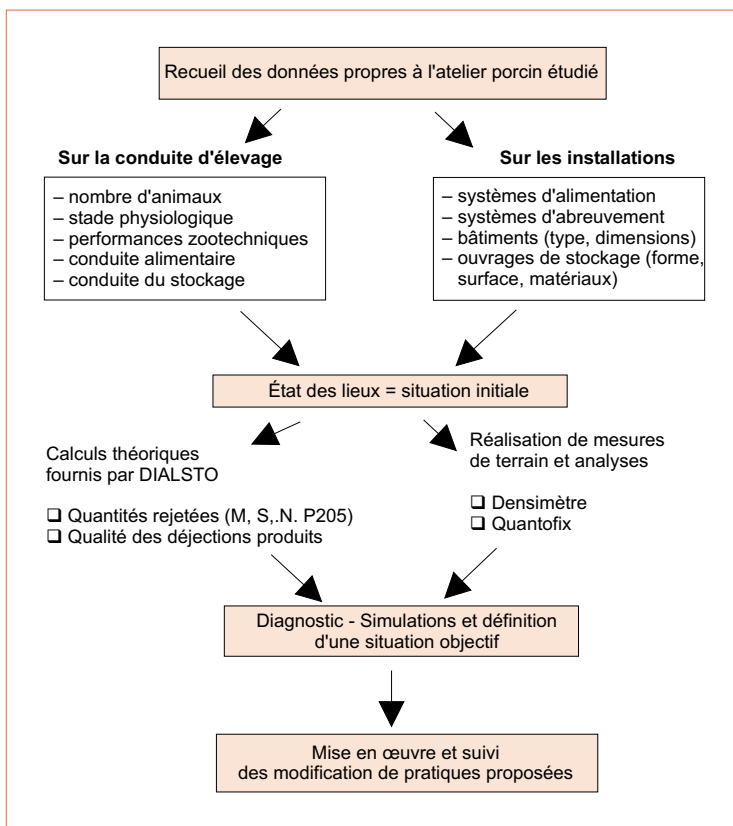
Cette méthodologie s'applique à des ateliers en grandeur réelle qui de plus sont rassemblés au niveau d'une unité géographique et hydrologique constituée ici par le bassin versant du Kerouallon.

■ **Une évaluation des excédents parcel-laires (N, P) et des améliorations envisageables basées sur des enregistrements des pratiques agricoles et un outil GESUFER**

Les bilans parcelaires pour l'azote, le phosphore (et le potassium) sont calculés par le logiciel GESUFER (Gestion, suivi de la fertilisation) à partir des informations recueillies en temps réel par un suivi des pratiques dans les exploitations. Cette phase déterminante de l'étude nécessite de nombreuses mesures de terrain et analyses de façon à quantifier du mieux possible les flux de nutriments, notamment ceux résultant des épandages et des récoltes. À partir de ces données, GESUFER calcule plusieurs types de bilans parcelaires en distinguant le cas de l'azote (élément mobile subissant de nombreuses transformations dans le sol...) de celui du phosphore (élément bien fixé par les sols...).

Pour l'azote nous utilisons quatre bilans. Le premier est un bilan de masse global dont le principe de calcul est : solde annuel du bilan = total des apports (N efficace des effluents d'élevage + N minéral des engrais) + apports du sol (minéralisation « basale » de l'humus + effets des apports antérieurs et de l'enfouissement des prairies + restitutions des animaux au pâturage...) - total des sorties (exportations par les cultures...). Le solde est un indicateur annuel de la quantité d'azote potentiellement polluante pour le sol, l'eau ou l'air.

Le deuxième est un bilan de fertilisation établi suivant le principe du bilan prévisionnel à partir des enregistrements des pratiques agricoles pour les apports et les besoins des cultures. C'est un indicateur annuel a posteriori sur l'excès ou le déficit de fumure. Le troisième est aussi un bilan de fertilisation calculé à partir des apports effectués en prenant en compte cette fois-ci un objectif de rendement optimum, fixé à la parcelle suivant ses caractéristiques agronomiques, son passé cultural... Il nous permet de chiffrer les améliora-



tions possibles par la mise en œuvre d'une fertilisation raisonnée. Le quatrième est calculé de manière identique au premier mais est soldé à l'automne. Il sert à comparer avec les quantités mesurées dans le sol à cette époque de façon à valider globalement nos estimations.

Les élevages bovins sont pris en compte par leurs rejets épandus sur les parcelles (fumiers, lisiers), par les restitutions aux pâturage et par les exportations des prairies. Ceux-ci sont évalués indirectement à partir de la différence entre les besoins des animaux, déterminés par leurs performances et les fourrages distribués et pâturés en utilisant les données issues d'un suivi parcelaire des pâturages (Turpin, Tranvoiz *et al.*, 1996).

Les pertes par volatilisation d' NH_3 lors des épandages des lisiers sont calculées en fonction de la teneur en MS du lisier et de la température de surface du sol au moment de l'épandage (Moal, 1995) et sont ensuite corrigées suivant la réalisation ou non d'un enfouissement.

▲ Figure 1. – Méthodologie d'analyse et de diagnostic de l'atelier porcin.

Pour le phosphore : GESUFER détermine un bilan global apports - exportations dont le solde est considéré comme un indicateur du risque de pollution et un bilan de fertilisation défini par : solde = total des apports - dose de fertilisation déterminée par rapport aux analyses de sol (teneurs en P_2O_5 assimilable Dyer) en utilisant les normes agronomiques régionales habituelles pour cet élément.

Par sommation des valeurs parcellaires, on établit ensuite chacun de ces bilans à l'échelle de l'exploitation et du bassin versant. Ceci permet finalement de réaliser un diagnostic environnemental personnalisé auprès des producteurs, de proposer des modifications argumentées des pratiques, tout en disposant de données quantitatives plus sûres pour l'étude des relations entre les pratiques agricoles et la qualité des eaux, ce qui répond à nos objectifs.

■ ***Une évaluation dynamique des quantités d'azote lixiviées basée sur des mesures à la parcelle et sur un modèle NBV1 (de la parcelle au bassin versant)***

Les mesures d'azote minéral dans les sols : plusieurs finalités...

À l'état brut, elles peuvent servir d'indicateurs environnementaux agronomiques sur les systèmes de culture et plus particulièrement sur l'adaptation des pratiques de fertilisation aux besoins des plantes cultivées. La difficulté est que l'azote apporté entre dans un cycle complexe, impossible à décrire précisément quantitativement dans le temps, d'où des difficultés d'interprétation. Associées à une modélisation, ces mesures peuvent aussi être utilisées pour évaluer quantitativement les pertes par lessivage sous le profil racinaire. C'est ce que nous avons privilégié dans notre étude en utilisant deux stratégies d'échantillonnage :

– une approche statique consistant à mesurer les reliquats d'azote minéral dans les sols en automne sur l'ensemble des parcelles.

En situation de fort drainage annuel (supérieur à 400 mm), des mesures sur cases lysimétriques à Quimper (29) montrent que tout le stock d'azote nitrique présent dans le sol avant la reprise du drainage en automne est lessivé (Simon, 1995). En appliquant ce principe au bassin versant du Kerouallon, pour lequel la lame drainante est régu-

lièrement supérieure à 400 mm, nous avons mesuré l'azote minéral du sol sur 0-90 cm (trois horizons) dans la totalité des 245 parcelles du bassin en fin septembre 1994 et mi-octobre 1995 avant la reprise du drainage. Ceci nous permet aussi d'étudier les relations entre ces deux indicateurs agronomiques courants que sont les bilans parcellaires et les reliquats mesurés.

– une autre plus dynamique, basée sur un suivi par quinzaine de l'azote minéral du sol dans un échantillon de 19 parcelles représentatives des successions de culture et des sols

Compte tenu de la durée de l'étude (2 ans), la principale rotation de cultures annuelles (maïs-céréales) a été décomposée en deux successions : céréales puis maïs ; maïs puis céréales. En tenant compte des principaux types de sol, l'échantillon est finalement constitué de 5 parcelles en succession maïs-céréales, 5 en céréales-maïs, 6 en prairies temporaires intensives, 2 en prairies humides de fond de vallée et 1 en jachère. La représentativité a été étudiée et jugée satisfaisante tant au niveau des sols que des pratiques (Launay, 1997). Ces mesures permettent de prendre en compte la fluctuation des quantités d'azote nitrique dans le sol pendant la saison de drainage qui résulte d'une part des cycles de nitrification et d'organisation, a priori non négligeable en automne-hiver sous ce climat océanique, et d'autre part des fertilisations azotées en fin d'hiver des céréales et des prairies.

La modélisation du flux d'azote dans les parcelles jusqu'à l'exutoire : le modèle NBV1

Le modèle est constitué par deux modules. Le premier est un modèle « agronomique » qui calcule pour chaque horizon du profil des 19 parcelles les flux d'eau et d'azote journaliers sortants ainsi que la minéralisation nette par quinzaine. Le deuxième est un modèle « hydrologique » qui utilise ces valeurs en entrée pour calculer les flux à l'exutoire en représentant les écoulements souterrains par deux réservoirs. Nous décrivons rapidement ci-dessous les principes employés.

Les flux journaliers d'azote dans le sol sont déterminés sur les 19 parcelles en utilisant l'équation de base du modèle de Burns (Burns, 1974) :

$$F = LD / (LD + (Vm * T / 100)) \quad (1)$$

F = fraction lessivée ; LD = lame d'eau drainante en cm ; Vm = humidité à la capacité au champ en % ; T = épaisseur de la tranche de sol en cm.

Le profil du sol est décomposé en deux ou trois horizons de 30 cm d'épaisseur suivant la profondeur du sol déduite de la carte pédologique. Chaque horizon est découpé en tranches de 1 cm d'épaisseur. Pour chacune, on considère qu'il y a drainage quand l'humidité calculée est supérieure à l'humidité à la capacité au champ et que le prélèvement des cultures s'arrête quand la réserve utile (RU) est épuisée. La consommation d'eau journalière des cultures est donnée par le calcul de l'évapotranspiration maximale (ETM) à partir de l'évapotranspiration potentielle journalière (ETP Penman) selon : $ETM = (ETP \times \text{coefficient ETM} / ETP \text{ variant suivant la culture et son stade})$. Les paramètres Vm, RU sont estimés par horizon à partir de la texture mesurée du sol (Riviere, 1992). Les consommations d'azote par les plantes sont calculées à la parcelle en partant de la consommation totale annuelle de la culture (Rendement * besoin unitaire) répartie ensuite journalièrement suivant une cinétique calée sur des stades critiques (semis-tallage, montaison-floraison pour les céréales et maïs et pour les semis de prairies). Le prélèvement journalier en eau et en azote est ensuite réparti par tranche le long du profil grâce à une simulation simplifiée de la croissance racinaire en profondeur. Les apports de fertilisants, après déduction éventuelle de la volatilisation ammoniacale sont affectés aux premières tranches du premier horizon pour les engrais organiques ou minéraux épandus en surface. Ceci permet finalement d'établir un bilan journalier pour l'eau et l'azote :

N lixivié pour la tranche xi =

$$\left[\begin{array}{cccc} N & N & N & N \\ \text{initial} & + \text{lixivié} & + \text{apport} & - \text{prélevé} \\ (xi) & (xi-1) & (xi-1) & (xi) \end{array} \right] \times F \% \quad (2)$$

$$N_{\text{final}}(xi) = \begin{array}{cc} N & N \\ \text{initial} & - \text{lixivié} \\ (xi) & (xi) \end{array} \quad (3)$$

En sommant journalièrement, puis par période de 15 jours calées sur les dates de mesures, on calcule finalement la quantité d'azote lessivée et la quantité d'azote résiduelle pour chacun des horizons puis pour la totalité du profil pendant la période. La différence entre le reliquat d'azote

calculé dans l'horizon à la fin de la période et la quantité mesurée est considérée comme une estimation des fournitures nettes du sol pendant cette période. Sur cette première version du modèle, les différents flux parceliaires journaliers d'eau et d'azote ainsi déterminés à partir de l'échantillon sont ensuite moyennés par succession de cultures puis extrapolés à l'ensemble de la SAU du bassin versant après pondération en fonction de la surface occupée par chaque culture. Nous disposons donc finalement d'une évaluation journalière des flux d'eau et d'azote minéral lessivé sous le profil cultural, qui sert ensuite d'entrée au module hydrologique (modèle conceptuel à réservoir) dont les principaux paramètres (coefficients de partage, volume des réservoirs, coefficients pour la courbe de tarissement) ont été « calés » à partir du suivi hydrologique de 1993. Les données concernant les parcelles culturales, l'occupation du sol, la surface imperméabilisée, la surface non cultivée sont gérées par un Système d'information géographique au travers des bases de données de GESUFER.

Résultats- Discussion

Des apports d'effluents étalés sur une bonne partie de l'année, souvent trop concentrés sur les maïs ; une fertilisation minérale azotée importante

18 000 m³ de lisier (principalement de porc) et 2 900 tonnes de fumier (de bovin) ont été épandus annuellement en 1994 et 1995 sur la surface agricole utile (SAU) du bassin. Les volumes ainsi que les quantités d'azote et de phosphore dans les effluents porcins épandus sont proches de celles calculées par le modèle DIALSTO. Les épandages d'effluents sont étalés sur une bonne partie de l'année de février à octobre avec un maximum en mars-avril correspondant à la fertilisation des maïs, un autre en août correspondant aux apports après la récolte des orges ou sur prairies et un dernier, variable suivant les conditions climatiques d'automne, en octobre, novembre avant les semis de céréales d'hiver. La contribution des effluents d'élevage à la dose totale d'azote apportée est de 30 % sur les céréales ; 53 % sur les prairies, 80 % pour les maïs. L'apport d'engrais minéral azoté du commerce est de 43 tonnes d'azote par an en 1994 et 1995 (soit

96 kg d'azote /ha de SAU) pour l'ensemble du bassin. Les apports de phosphore et potasse proviennent essentiellement des effluents d'élevage.

Un excédent annuel, au niveau du bassin, de 95 tonnes d'azote et de 13 tonnes de phosphore avec des soldes positifs dans toutes les exploitations et des bilans parcelaires très variables

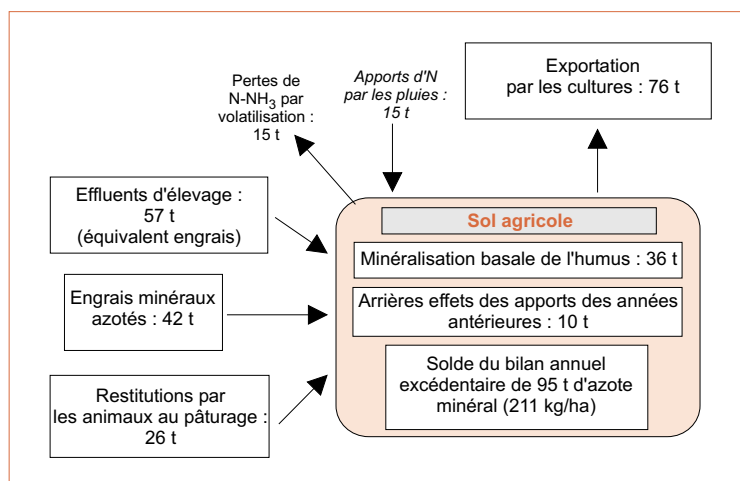
L'excédent annuel d'azote minéral calculé suivant la méthodologie GESUFER (figure 2) est de 95 tonnes (211 kg/ha de SAU). Toutes les exploitations ont un solde de bilan global et de fertilisation positif. Il n'apparaît pas de liaison entre le système de production dominant de l'exploitation et les bilans parcelaires. Les exploitations laitières ou de production de viande ont des bilans aussi déséquilibrés que des exploitations « porcines ». Les prairies ont des bilans plus excédentaires que les parcelles portant des cultures annuelles en raison de l'importance des fertilisations azotées qu'elles reçoivent et des restitutions par les animaux au pâturage, lesquelles sont parfois supérieures aux quantités exportées par le pâturage proprement dit (Turpin, Tranvoiz *et al.*, 1996). Les cultures de maïs ont aussi des bilans excédentaires en raison de l'excès d'apports d'effluents d'élevage (fumiers, lisiers) alors que les céréales sont équilibrées, voire déficitaires du point de vue de la fertilisation au sens strict mais excédentaires si on prend en compte les apports d'automne après la récolte avant l'implantation de la céréale sui-

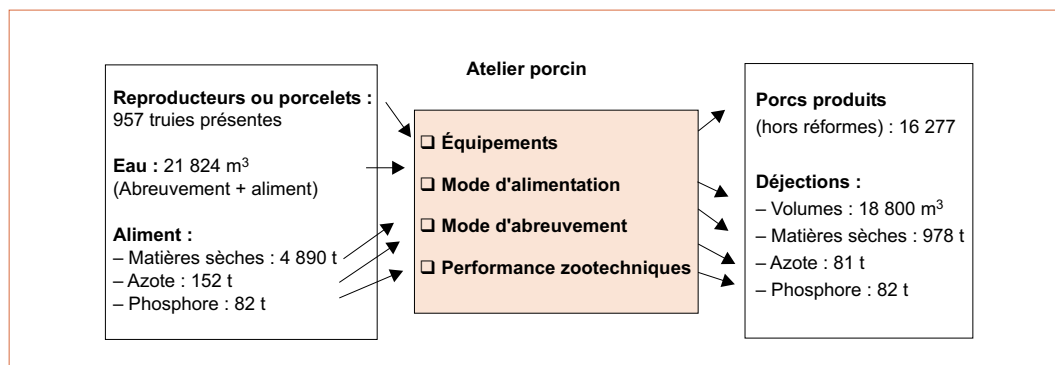
vante. La variabilité interparcelaire est très élevée. Finalement, il n'est pas possible d'attribuer les excédents élevés à une culture donnée ou à un élevage, ou à une exploitation, sauf dans des cas extrêmes. Tout est déterminé en fait par les pratiques de fertilisation et de conduite des cultures.

À l'aide des bilans azotés de fertilisation parcelaires, nous calculons que la mise en œuvre d'une fertilisation azotée raisonnée, utilisant les effluents d'élevage sur la totalité de la SAU, permettrait une réduction de 37 % de l'excédent annuel actuel en maintenant des doses de fertilisation azotée compatibles avec l'optimum de rendement technique et économique. Il y a donc une marge de progrès théorique importante qui provient en fait du remplacement des engrais minéraux azotés par les effluents d'élevage chaque fois que cela est possible techniquement. Cette réduction passe obligatoirement par une modification de la répartition des épandages d'effluents sur les cultures (moins sur maïs, plus sur céréales et prairies) et entre les exploitations porcines et bovines. Pour cela, il faut prévoir une augmentation de la capacité de stockage des effluents de façon à pouvoir les gérer plus indépendamment des conditions climatiques. En prenant en compte les problèmes d'épandage des lisiers (pente des parcelles, distances aux cours d'eau, exigences des cultures, distances aux habitations, époques d'interdiction...), nous déterminons, pour le court terme, une marge de réduction réelle plus faible de l'ordre de 25 % de l'excédent total actuel. L'augmentation de la surface épandue et l'utilisation sur des céréales d'hiver ou sur prairies risque d'augmenter les apports précoces vers la fin de l'hiver, sans possibilité d'enfouissement dans le cas des céréales, d'où un risque d'augmentation de l'entraînement direct par les pluies dans le réseau hydrographique et de contaminations bactériennes des prairies et de l'eau qu'il conviendrait d'évaluer et de suivre très attentivement dès maintenant.

L'amélioration proposée ci-dessus ne concerne que l'azote. Les soldes des bilans en phosphore sont également excédentaires de 13 tonnes (26,5 kg/ha de SAU) de même d'ailleurs que ceux en potassium. La marge de réduction par la fertilisation raisonnée est faible car les sols sont souvent largement pourvus comme l'ont montré les analyses de P₂O₅ assimilable (méthode Dyer) réalisées sur la totalité des parcelles à l'automne 1994.

Figure 2. – Bilan de l'azote minéral sur le bassin versant du Kerouallon. ▼





◀ Figure 3. – Bilan des ateliers porcins du bassin versant.

L'analyse des exploitations porcines...

L'échantillon est constitué de 12 élevages porcins de type naisseur-engraisseur. L'effectif suivi est composé de : 2 211 truies, 46 656 porcelets et de 41 987 porcs charcutiers. D'autre part, 2 900 porcelets ont été exportés du bassin expérimental. Les bilans matière à intrant/sortant ont été réalisés pour chacun des élevages puis agrégés au niveau du bassin versant (figure 3).

■ Diagnostic et analyse de la situation actuelle

Les éléments du bilan cachent une très grande disparité de résultats d'un élevage à l'autre pour l'ensemble des critères étudiés. Pour illustrer nos propos, nous prendrons l'exemple du stade engraissement qui représente la moitié des volumes rejetés et près des 2/3 de la matière sèche, de l'azote et du phosphore rejeté par le cheptel porcin..

Nous évaluerons principalement l'impact des pratiques d'élevage à travers leurs répercussions sur les rejets azotés et phosphorés.

Incidence de performances zootechniques très hétérogènes sur les rejets. Exemple de l'engraissement

L'échantillon se situe dans la moyenne des élevages français (tableau 1). Malgré tout, les valeurs cachent des degrés d'intensification et de performances très variables. Si l'on prend l'exemple de l'Indice de Consommation (IC = quantité d'aliment consommée par un porc pour produire 1 kg de croît), une seule des exploitations correspond à la valeur référence « Standard » (CORPEN, 1996) soit 2,93, le reste de l'échantillon étant éloigné de cette moyenne. Nous avons mis en évidence qu'une baisse de l'Indice de consommation

(IC) de seulement 0,1 point entraîne la même limitation des rejets azotés qu'une baisse de 0,5 points du taux de matière azotée dans l'aliment. L'IC est donc un facteur prépondérant à prendre en compte dans la gestion des rejets d'élevage.

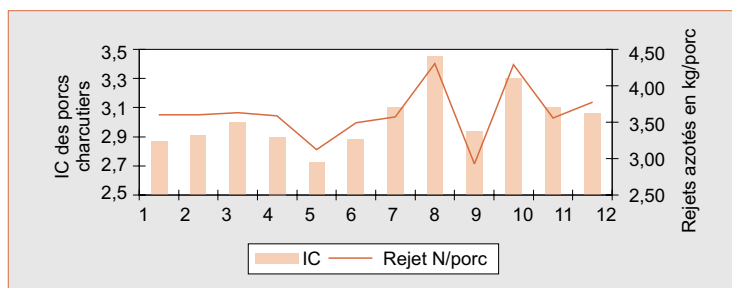
La figure 4 souligne cette liaison étroite entre l'IC et les rejets azotés ; elle met en évidence la variabilité des rejets azotés produit par porc

Tableau 1. – Situation de l'échantillon par rapport à la moyenne des élevages français pour 1995.

*GTE Gestion technico économique. ▼

	Échantillon (12 exploitations)			Résultats GTE* (1 ^{er} semestre 95)	
	Mini	Maxi	Moyenne	Moyenne	Écart-type
Poids d'entrée	25	33	28,6	31,3	4,9
Poids de sortie	105	112	109,5	108	3,2
Durée	93	115	108	105	–
Nombre de bandes/an	2,6	3,36	3,06	–	–
Consommation/porc/j	2,19	2,34	2,23	2,20	0,17
IC technique	2,75	3,40	3	2,90	0,23
GMQ (g/j)	682	818	752	730	66

Figure 4. – Liaison entre performances zootechniques et rejets azotés par porc. ▼



selon les élevages. Le diagnostic individuel s'impose donc afin de caractériser chaque système de production et de déterminer avec précision les pratiques améliorantes à mettre en œuvre.

Incidence des pratiques alimentaires sur les rejets azotés et phosphorés du stade engraissement.

L'analyse des pratiques alimentaires souligne les dysfonctionnements dans la mise en œuvre de l'alimentation dite biphasée résumés dans le tableau 2.

La moitié des élevages porcins considérés disent pratiquer l'alimentation biphasée alors que seulement deux élevages présentent des rejets inférieurs ou égaux à la référence « standard » (aliment unique) qui est de 3,25 kg d'azote/porc. En effet, une mise en œuvre imparfaite de cette pratique peut conduire à des apports azotés encore trop importants. Les élevages pratiquant l'alimentation monophasée (aliment unique) présentent également des rejets azotés supérieurs de 15 % au modèle de référence. Contrairement aux cas précédents, les taux de matière azotée de l'aliment sont respectés : environ 17 %, mais ce sont ici les performances zootechniques insuffisantes qui expliquent ces niveaux élevés.

L'analyse des pratiques alimentaires vis-à-vis du phosphore confirme ce type de dysfonctionnements dans la stratégie alimentaire dans près de la moitié des élevages suivis.

■ **Évaluation théorique des modifications de pratiques en amont de la production de déjections.**

Les modifications de pratiques présentées dans ce chapitre constituent des mesures préventives, en amont de la production des déjections porcines. Elles concernent la globalité de l'atelier porcin et s'appliquent également aux truies, aux porcelets et aux porcs à l'engrais.

Comme nous l'avons vu précédemment dans l'échantillon, les apports alimentaires azotés et phosphorés sont souvent excédentaires par rapport aux besoins des animaux. Lorsqu'ils sont en plus associés à des performances zootechniques insuffisantes, cela conduit à des gaspillages importants qui viennent augmenter les quantités de déjections produites dans les ateliers porcins et qui constituent un risque supplémentaire de surfertilisation.

Nous avons étudié l'effet de ces modifications en trois étapes successives.

• **L'amélioration des performances zootechniques**

Cette étape constitue un préalable à toute intervention sur les élevages. Ainsi, l'amélioration des pratiques alimentaires ne produira pas les effets escomptés si elle est mise en œuvre sur un atelier présentant de multiples dysfonctionnements qui s'expriment par de faibles performances.

Tableau 2. – Mise en œuvre de l'alimentation biphasée sur le bassin par rapport aux références du CORPEN.

	L'alimentation biphasée en azote		L'alimentation biphasée en phosphore	
	Préconisations du CORPEN	Mise en œuvre dans l'échantillon	Préconisations du CORPEN	Mise en œuvre dans l'échantillon
Aliment croissance	16,5 % de MAT	17 % de MAT	0,52 % de P total	0,63 % de P total
Aliment finition	15 % de MAT	16,2 % de MAT	0,45 % de P total	0,60 % de P total
Part aliment finition	60 % du total consommé	80 % du total consommé	60 % du total consommé	80 % du total consommé
Rejet (kg/porc)	2,70 kg	3,51 kg d'N/porc (mini = 2,93 maxi = 3,78)	1,45 kg de P ₂ O ₅ /porc	1,84 kg (mini = 1,54 maxi = 1,98)

Voies d'amélioration	Limitation des rejets			
	Azoté (N en tonnes)		Phosphoré (P en tonnes)	
	Échantillon	Bassin	Échantillon	Bassin
Amélioration des indices de consommation + cohérence des pratiques alimentaires pré-existantes	11,3	4,8	1,8	0,8
Alimentation biphasée dans tous les élevages	7,3	3,1	6,6	2,7
Cumul des voies préventives	18,6	7,9	8,4	3,5
% de réduction par rapport à la situation initiale	9 %		17 %	

◀ Tableau 3. – Évaluation de l'effet des modifications de pratiques sur les rejets azotés et phosphatés.

Sans modification importante des ateliers en place, nous avons considéré que l'on pouvait ramener l'ensemble des Indices de consommation en engraissement à un niveau inférieur ou égal à 3 et à 1,85 en post-sevrage. Sur l'ensemble de l'échantillon, la réduction des rejets azotés annuels est de 5 % pour le bassin. Une amélioration plus poussée des performances ne pourrait être réalisée sans investissement, notamment au niveau des bâtiments.

• **La modification des pratiques alimentaires préexistantes**

Il s'agit, dans un premier temps, de rendre plus cohérentes les pratiques mises en œuvre en limitant les taux de matière azotée ou de phosphore présents dans l'aliment et en corrigeant les proportions des différents types d'aliments distribués. Là encore, il n'y a pas d'investissement complémentaire à prendre en compte puisque l'ensemble des équipements nécessaires à ces pratiques sont déjà présents. Lorsque les élevages ne présenteront plus les dysfonctionnements majeurs précédents, de nouvelles pratiques améliorantes pourront alors être mises en œuvre.

• **L'alimentation biphasée mise en œuvre dans tous les élevages**

L'introduction de ce mode d'alimentation dans tous les élevages qui ne le pratiquaient pas antérieurement, entraîne une réduction des rejets en azote et en phosphore respectivement de 3,5 et 13 % sur le bassin versant (tableau 3).

• **Le cumul des différentes voies d'amélioration destinées à limiter les rejets azotés porcins**

La mise en œuvre simultanée des pratiques améliorantes proposées ci-dessus permet, d'un point de vue théorique, une réduction de rejets d'azote et de phosphore respectivement de 18,6 et 8,5 tonnes pour la totalité du cheptel suivi (tableau 3) ; soit 7,9 (équivalent à 35 T de NO₃) et 3,5 tonnes sur le bassin du Kerouallon.

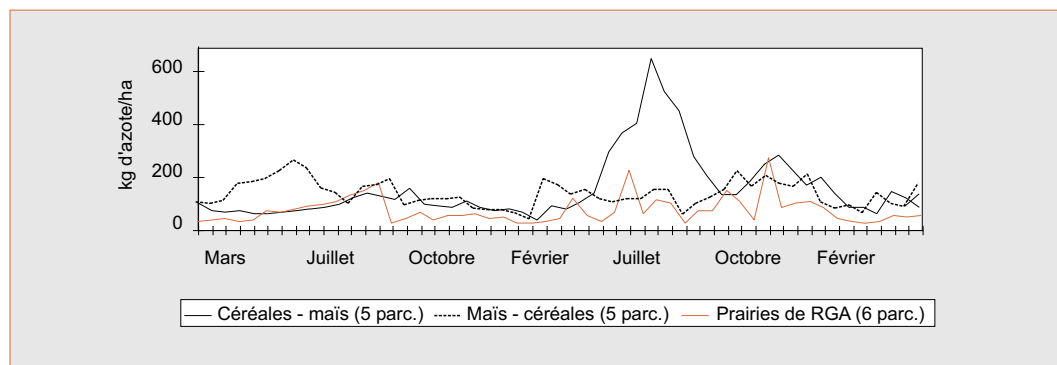
Le passage à l'alimentation biphasée représente 78 % de la limitation des rejets en phosphore et 40 % de la réduction des rejets azotés. Le stade engraissement constitue à lui seul : 80 % et 65 % de la marge de progrès définie respectivement pour l'azote et le phosphore. Ces valeurs moyennes cachent toutefois de très fortes disparités entre les ateliers pour tous les critères analysés. Les exploitations ont des marges de progrès très variables. Ainsi, dans notre échantillon, deux ateliers ont déjà optimisé leur filière de production et de stockage des déjections porcines. Dans ces cas, les mesures préventives présentées ci-dessus ne produiront que peu d'effets et les mesures curatives semblent devenir l'ultime recours.

Des parcelles à l'exutoire

■ **Des reliquats automnaux d'azote dans les sols élevés, variables suivant les cultures précédentes**

Les quantités moyennes d'azote minéral mesurées dans le sol avant la reprise du drainage varient peu entre 1994 et 1995 et sont respectivement de

Figure 5. – Évolution de l'azote minéral dans les sols de 16 parcelles (cumul des trois horizons en kg/ha de N-NO₃) par quinzaine. Moyennes pour 3 successions de cultures du 1^{er} mars 1994 au 30 avril 1996.



120 et 130 kg d'azote (principalement N-NO₃) par ha. Le reliquat après maïs est plus élevé (160 kg d'azote par ha) qu'après céréales (80 à 100 kg d'azote/ha). L'ensemble des prairies se sépare en deux groupes : les prairies « humides » où le reliquat est de 80 kg d'N/ha et les prairies temporaires à base de Ray-Grass Anglais (120 kg d'N/ha). Les valeurs les plus basses sont obtenues sur jachères ou sur les parcelles non fertilisées. Comme dans le cas des excédents, la variabilité inter-parcellaire est élevée et les moyennes sont peu significatives. Nous n'avons pas trouvé de liaisons entre les différents bilans calculés et les reliquats d'azote minéral mesurés dans les parcelles à l'automne tant à l'échelle parcellaire, qu'à celle des exploitations. Les bilans sont représentatifs des pratiques mais l'interaction avec le sol complique la comparaison avec un « reliquat » qui est une mesure ponctuelle traduisant un état du sol de la parcelle à un moment donné, dépendant en particulier des conditions climatiques récentes.

Pour l'ensemble des sols cultivés du bassin, le stock d'azote minéral présent dans le sol avant la reprise du drainage à l'automne et « potentiellement lessivable » est donc évalué à 50 tonnes environ en 1994 et 1995. Cette mesure est identique à la valeur calculée en cumulant les bilans parcellaires soldés aux mêmes dates, ce qui conforte tout de même l'ordre de grandeur des bilans calculés. Si l'on fait l'hypothèse que ce stock est entièrement lessivé pendant l'hiver, la concentration moyenne pendant la saison de drainage intense de l'eau sortant des parcelles serait de 80 mg de NO₃/l pour une lame drainante de 600 mm (cas 1995/96) et de 49 mg par litre pour une lame de 1 000 mm (cas 1994/95). Ces valeurs sont nettement supérieures aux 37 mg de NO₃/l mesurés en moyenne

à l'exutoire et traduisent déjà un abattement entre les sols et l'eau de surface. L'hypothèse d'un lessivage hivernal d'un stock constitué à l'automne n'est pas vérifiée dans nos conditions d'étude.

■ *Le suivi de l'azote minéral dans les sols*

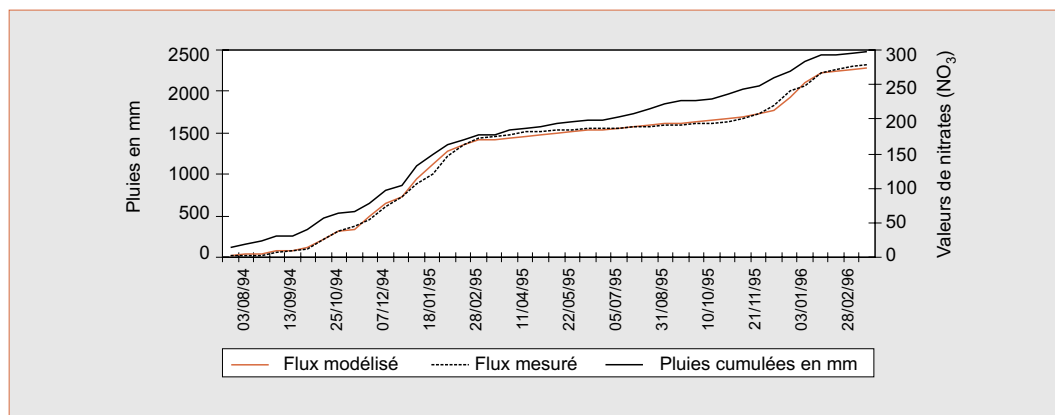
De très grandes fluctuations intra et inter-annuelles confirment le rôle primordial joué par l'activité du sol sur le stock potentiellement lessivable à un moment donné.

Pour les deux années, le suivi confirme l'excès des apports (figure 5). Les plus fortes teneurs sont trouvées sur les cultures de maïs en début juillet et pour toutes les cultures en automne. Ces périodes de forte teneur sont décalées de plusieurs mois par rapport aux principales époques d'apports de fertilisants. En automne, la teneur du sol en azote minéral varie de façon significative, même en l'absence de pluie ce qui conduit à relativiser, dans cette région à climat océanique marqué, la valeur du « reliquat » d'azote mesuré à une seule date en tant qu'indicateur d'un risque de lessivage en hiver.

■ *Les fournitures d'azote minéral par le sol*

On observe des quantités plus élevées et une dynamique différente dans les successions de cultures annuelles par rapport aux prairies.

Pour les cultures annuelles, les quantités cumulées calculées par NBV1 dans l'horizon de surface sont globalement élevées : 245 kg d'azote /ha en moyenne. Outre les périodes classiques de minéralisation (automne et printemps), le modèle révèle des phases de minéralisation moins intenses



◀ Figure 6. – Pluies cumulées, flux de nitrates cumulés (en tonnes de NO₃) mesurés et modélisés par le modèle NBV1 à l'exutoire du bassin versant du Kerouallon du 01/08/1994 au 01/05/1996.

mais relativement longues pendant tout l'hiver. Les excédents azotés, réorganisés dans les sols en fin d'été, réalimentent le sol en azote minéral potentiellement lessivable de façon plus ou moins importante suivant les conditions de température d'automne et d'hiver.

Pour les prairies, les quantités d'azote libérées cumulées dans l'horizon de surface sont de 13 kg/ha en moyenne pour les 6 parcelles de l'échantillon. La répartition dans le temps est également différente et se présente sous la forme d'une succession de courtes périodes de libération et de périodes de solde négatif (réorganisation et/ou dénitrification).

Dans l'horizon 30-60 cm, le solde est négatif à toutes les époques quelque soit la culture, ce qui peut plutôt s'interpréter comme une dénitrification à ce niveau.

- **Le flux d'azote à l'exutoire : une partie seulement de l'excédent est rejeté en raison d'un abattement dans les sols cultivés et secondairement lors des transferts souterrains**

Les pertes d'azote par lixiviation sous le profil racinaire sont variables suivant les successions de culture et sont difficiles à expliquer par les bilans parcellaires

Les pertes d'azote cumulées évaluées par le modèle NBV1 du 1^{er} août 1994 au 1^{er} mai 1996 sont en moyenne beaucoup plus élevées pour les successions à base de cultures annuelles (323 kg d'N/ha) que pour celles à base de prairies (186 kg/ha). Dans les parcelles pas ou peu fertilisées, les pertes sont nettement plus basses (42 kg/Ha) sans être

toutefois nulles, y compris pour la jachère qui n'a reçu aucun apport d'azote depuis au moins 2 ans. Finalement, 76,5 % des excédents azotés des successions de cultures annuelles (céréales-maïs et maïs-céréales) sont entraînés sous la zone racinaire par les eaux contre seulement 44 % pour les prairies. Pour ces dernières, on sait qu'une partie de l'azote ainsi immobilisée est libérée lors du retournement. Cependant, on peut aussi avancer l'hypothèse que l'augmentation du temps de séjour de l'azote dans le sol accentue globalement les fuites dans l'atmosphère du fait de la dénitrification ou par les émissions de NO et/ou N₂O lors des cycles successifs de nitrification/organisation.

Nous n'avons pas trouvé de liaison entre les pertes, les bilans parcellaires et les reliquats d'automne tant pour les parcelles en cultures annuelles que pour celles en prairies temporaires.

Le couplage entre une modélisation agronomique et une modélisation hydrologique simplifiée permet, sur ce bassin, une bonne représentation des flux d'azote à l'exutoire.

Les flux de nitrates calculés par périodes de 15 jours puis cumulés reproduisent fidèlement ceux mesurés à l'exutoire (figure 6). La pluviométrie pendant l'automne et l'hiver joue un rôle déterminant sur les quantités transférées à l'exutoire.

L'écart entre modélisé et mesuré est inférieur à 4 % (tableau 4). L'azote dans l'eau à l'exutoire ne représente qu'une partie de l'excédent minéral apporté sur les parcelles : 50 % pendant la période de drainage 1994/95 et seulement 25 % pendant la période de drainage 1995/1996. Le modèle NBV1 fournit quelques éléments d'ap-

Tableau 4. – Flux d'azote cumulés mesurés et modélisés à l'exutoire de bassin versant de Kerouallon pendant la période principale de drainage (août à mars) en 1994 et 1995 et pendant la durée totale de l'étude.

	Lame drainante en mm	N-NO ₃ mesuré en tonnes	N-NO ₃ modélisé en tonnes	Écart Mod./Mes. en %
du 01/08/1994 au 30/03/1995	1 139	39,7	38,7	-2,5
du 01/08/1995 au 30/03/1996	391	20,5	19,7	-3,9
Période totale du 01/08/1994 au 30/03/1996	1 546	63,1	61,8	-2,0

précision sur la localisation de cette diminution : 29 % dans les parcelles, principalement de prairies ; 18 % au niveau du « réservoir » du modèle, c'est-à-dire lors du transfert dans les eaux souterraines ; 6 % sont des pertes hors du bassin versant et enfin 10 % correspondent à la variation de stock du réservoir. En revanche, les pertes d'azote dans les eaux de surface au cours de leur circulation dans le réseau hydrographique semblent faibles. Cette constatation n'est pas totalement surprenante car un relevé précis du réseau hydrographique et des zones humides montre que la plupart de ces dernières sont court-circuitées par des fossés ou par des drainages ponctuels aussi bien dans les zones d'amont, que dans celles de fond de versant.

Conclusion

Les flux d'azote dans l'eau proviennent essentiellement des apports excédentaires d'effluents d'élevage bovins et porcins sur les parcelles agricoles et peu directement des élevages. Une réduction rapide de 25 % de l'excédent d'azote pourrait être obtenue par une gestion intégrée (réduction des doses, répartition différente) des effluents d'élevage au niveau du bassin. En cumulant les actions proposées sur les élevages porcins, sur les parcelles avec celles possibles sur les prairies et élevages bovins (Turpin, 1996), on arrive finalement à une possibilité de réduction pour l'azote de 46 % de l'excédent actuel. Pour le phosphore, la marge est réduite car les sols sont déjà suffisamment pourvus et car les apports de fertilisants minéraux sont déjà très réduits. Une amélioration trop ponctuelle ou mal raisonnée du point de vue de l'azote pourrait conduire à une aggravation de la situation

pour cet élément comme d'ailleurs pour d'autres éléments (métaux lourds, K...). La diminution des rejets par des actions dans les élevages est la principale voie d'amélioration opérationnelle rapidement.

L'ensemble des modifications de pratiques, simulé par l'outil DIALSTO, constitue une voie préventive et souvent peu onéreuse de réduction des quantités d'azote et de phosphore rejetées.

Une meilleure adéquation des apports alimentaires de ces deux nutriments aux besoins des animaux, par le passage d'une alimentation unique à l'alimentation biphasee, peut s'accompagner d'une réduction des rejets en azote et en phosphore de 15 à 20 % selon les performances et les stratégies alimentaires de la situation initiale (CORPEN, 1996). Sur l'échantillon étudié, cette alimentation biphasee entraîne une réduction de 9 et 17 % des rejets en azote et en phosphore. La différence entre les valeurs théoriques et celles obtenues sur le bassin versant est liée à la prise en compte de contraintes présentes sur les élevages, telle que par exemple l'existence de fabrications d'aliment à la ferme, qui ne permettent pas toujours une gestion optimisée des apports.

L'utilisation de références, même si elle permet de caractériser un groupe d'exploitations, ne peut conduire à la prise en compte de la grande disparité des pratiques mises en œuvre et de l'importante variabilité des quantités et qualités de rejets produits dans les élevages. La méthodologie valorisée par l'outil DIALSTO assure une approche plus dynamique et aboutit à l'identification des ateliers ayant les meilleures marges de progrès pour une modification de pratique donnée. Ceci ap-

paraît comme une étape importante dans l'évaluation théorique des résultats que l'on peut attendre d'une action donnée et permet aussi d'accompagner spécifiquement les éleveurs dont les systèmes d'exploitation sont susceptibles de répondre favorablement à l'action entreprise.

Nous n'avons pas trouvé de relations nettes entre les bilans parcelaires azotés, les reliquats d'azote minéral mesurés dans les sols en automne et les quantités d'azote lessivées, ce qui rend incertain l'utilisation des seules méthodes par « bilan » pour l'évaluation réelle des modifications mises en place sur des bassins versants de plus grande surface.

Moins de 40 % de l'excédent d'azote apporté sur les parcelles est mesuré dans l'eau à l'exutoire. Le modèle NBV1 suggère que cette diminution se produit dans les sols et dans les eaux souterraines. Pour le sol, on ne peut pas en déduire qu'il s'agit

d'une épuration car une proportion importante des flux entre dans le pool complexe de l'azote du sol (cas des prairies notamment) et devient diffus dans le temps. En revanche, le rôle important des zones humides sur la dénitrification des eaux est connu. L'aménagement actuel du bassin contribue à réduire leur action, notamment pour les eaux les plus superficielles. Il y a donc une marge de progrès à ce niveau, qui reste à mieux évaluer pour l'azote, mais aussi pour le phosphore, les métaux lourds et les pesticides. □

Merci à P. Serrand (Cemagref, 17 avenue de Cucillé, 35044 Rennes Cedex) et J. Coppenet (Établissement Départemental d'Élevage, Route Kerlavic, 29000 Quimper) pour leur participation active aux suivis des pratiques et des parcelles.

Résumé

Parmi les causes de dégradation de la qualité de la l'eau en Bretagne, les rejets d'effluents d'élevage par l'activité agricole sont mis en cause. Pour optimiser la gestion de ces effluents, des méthodologies d'analyse et de diagnostic des pratiques agricoles ont été élaborées et appliquées sur un bassin versant d'élevage intensif (bovins et porcins) de 6 km² en excédent structurel dans le Nord Finistère. Les objectifs sont de quantifier les flux de nutriments (N, P), de proposer et d'évaluer rapidement les modifications de pratiques à mettre en œuvre pour réduire ces flux principalement dans l'eau. Pour les 12 élevages porcins étudiés, on note une très forte variabilité des performances zootechniques, des pratiques alimentaires et donc des rejets en azote et phosphore. La mise en œuvre de pratiques d'alimentation moins pénalisantes pour l'environnement telles que l'alimentation biphasée dans les élevages porcins, permettrait de diminuer les rejets d'azote et phosphore dans les effluents de façon significative. Les marges de progrès sont cependant très variables suivant les ateliers. Pour les élevages bovins, les excédents sont aussi élevés et des améliorations importantes sont possibles par une meilleure gestion du pâturage notamment.

L'excédent annuel du bilan d'azote, calculé à partir des valeurs parcelaires est de 210 kg/ha. Il se retrouve dans les sols à l'automne et pendant tout l'hiver. La réduction que l'on peut attendre par une meilleure gestion de la fertilisation est de l'ordre de 25 % pour l'azote. Pour le phosphore, la marge de progrès est très faible car les sols sont déjà bien pourvus. Les pertes d'azote sous le profil, estimées par le modèle NBV1 à partir des mesures dans le sol, sont plus élevées pour les cultures annuelles que pour les prairies. Nous avons pu relier sur ce bassin des quantités d'azote dans les sols et des flux à l'exutoire grâce à une modélisation relativement simplifiée. Un abattement d'azote de 40 % est trouvé entre les excédents et l'exutoire. Cette diminution importante se produit dans les sols agricoles (dénitrification/organisation...) et aussi dans les eaux souterraines (de l'ordre de 18 % des excédents), vraisemblablement dans les zones humides qui occupent 23 % de la surface du bassin. Pourtant, aussi bien en amont qu'en fond de vallée, l'aménagement actuel du bassin est défavorable à leur action en raison d'un réseau dense de drainage et de fossés profonds qui canalise les eaux les plus chargées en nitrates provenant de la zone insaturée.

Abstract

One of the reasons for the deterioration in the water quality in Brittany is the effluent discharged from stock breeding farms. To optimise the management of this waste, methods for analysing and assessing agricultural practices were drawn up and applied in a 6 km² catchment area in North Finistère with intensive stock breeding (beef and pigs) with levels exceeding the limits. The aims were to quantify the levels of nutrients (N, P) and to propose and assess changes in farming practices that would reduce these levels, in particular in water. The 12 pig units studied revealed very marked differences in breeding performance, feeding practices and therefore in nitrogen and phosphorus levels in the effluent. The introduction of feeding practices that were less damaging to the environment, such as two phase feeding for pig farms, would considerably reduce nitrogen and phosphorus levels in effluent. However the scope for improvement varies considerably depending on the farm. Levels in cattle farms were also excessively high and considerable improvements could be made in particular by better pasture management.

The annual excess nitrogen level, calculated from individual plots, was 210 kg/ha. It was found in the soil in autumn and for the whole winter. Better fertilisation management could be expected to reduce the nitrogen level by 25%. There was very little room for improving the phosphorus level as the soil already had a high phosphorus content. Nitrogen losses, estimated using the NBVI model from soil measurements, were higher for annual crops than for pasture. We were able to link nitrogen levels in the soil in this basin with output flows using a relatively simplified model. The excess nitrogen was reduced by 40% in the outflow. This considerable reduction applied to agricultural ground (denitrification/metabolisation) and also underground water (about 18% of the excess), probably in the wetlands which cover 23% of the area of the basin. However, upstream as well as downstream, the current structure of the basin is not conducive to their action as there is a dense drainage network and deep ditches which channel the water that is most heavily loaded with nitrates coming from the unsaturated zone.

Bibliographie

- BURNS, I.G., 1974. A model for predicting the redistribution of salts applied to fallow soils after excess rainfall or evaporation. *Journal of Soil Science* (25), p. 165-177.
- CANN, C., 1995. *Flux de nutriments d'origine agricole vers la rade, Contrat de baie Rade de Brest*, Rapport final 1994, décembre 1995.
- CORPEN, 1996. *Estimation des rejets d'azote et de phosphore des élevages de porcs, Impact des modifications de conduite alimentaire et des performances techniques*, 23 p.
- JACQUIN, N., 1992. *Les coûts de la réduction de la pollution en région d'élevage intensif*, Thèse au Cemagref, Université de Paris XII, Val-de-Marne, 210 p.
- LAUNAY, M., 1997. *La pollution diffuse par l'azote sur le bassin versant de l'Elorn, Diagnostic de risque par agrégation de données à différentes échelles*, Thèse de doctorat, Université de Rennes II, Haute Bretagne.
- MOAL, J. F., 1995. *Volatilisation de l'azote ammoniacal des lisiers après épandage*, coll. Études, série Équipement pour l'eau et l'Environnement n° 20, Cemagref.
- RIVIERE, J.M., TICO, S., DUPONT, C., 1992. *Méthode tarière, massif armoricain, Caractérisation des sols*, ENSA, INRA, Chambre d'agriculture de Bretagne.
- SIMON, J.C., 1995. *Lessivage de l'azote nitrique et des cations accompagnateurs, Une situation de référence, Le climat atlantique très pluvieux, quelques éléments de comparaison avec les autres situations françaises*, Compte rendu de l'Académie d'agriculture de France, n° 81 (4).
- TURPIN, N., TRANVOIZ, M., BORDENAVE, P., ORAIN, B. et al., 1996. *Bassin versant de Kérouallon : diagnostic de risques de pollutions d'origine agricole, Contrat de baie Rade de Brest*, Rapport final 1994, Cemagref, Chambre d'agriculture du Finistère, 40 p.