

Enrichissement en phosphore des sols d'un bassin versant

Philippe Comlan

L'eutrophisation, correspond à l'enrichissement du milieu en éléments nutritifs, azote et phosphore essentiellement. Elle se manifeste dans l'eau par le développement excessif des végétaux, algues ou plantes. Ces manifestations sont de plus en plus fréquentes. En mer, elles prennent la forme de proliférations d'algues sur le littoral, le plus souvent des ulves, qui se déposent ensuite sur les plages et y pourrissent, ou de développements de phytoplancton au large. En eau douce, des végétaux aquatiques prolifèrent dans les rivières et surtout les lacs et étangs. Il peut s'agir de végétaux supérieurs, aussi bien que d'algues ou de plancton. Les végétaux en développement peuvent parfois consommer tout l'oxygène dissous, disponible dans l'eau, et provoquer ainsi la mort de la faune aquatique par asphyxie (encadré 1).

Pour étudier le transfert de phosphore des sols vers l'eau, des études sont menées sur des bassins versants par le Cemagref. Elles confirment que c'est en crue et sous forme adsorbée que le phosphore transite dans les ruisseaux. Des modèles régressifs ont été ajustés qui relient notamment les concentrations en phosphore à l'exutoire des bassins versants avec les concentrations en matières en suspension sous forme minérale et sous forme organique, ainsi qu'avec les crues précédentes. Ils présentent une structure identique sur tous les bassins, ce qui montre que les mécanismes de départ du phosphore des sols vers l'eau sont les mêmes sur tous les bassins.

L'ajustement des coefficients des modèles sur chaque bassin conduit, cependant, à des valeurs optimales différentes pour le coefficient des matières

en suspension. Ce coefficient traduit conceptuellement la richesse en phosphore des matières en suspension. Pour vérifier cette hypothèse, nous cherchons à établir une relation entre les teneurs en phosphore des sols vulnérables à l'érosion, celles des matières en suspension et ces coefficients obtenus par régression.

C'est sur le bassin versant du Coët-Dan, géré par le groupement de Rennes du Cemagref depuis 1971, qu'ont été menés les premiers travaux pour étudier le transfert de phosphore au cours des crues. Les quantités de phosphore qui partent ainsi vers l'eau sont minimales en regard des quantités mises en jeu par l'activité agricole, mais elles sont néanmoins énormes par rapport aux quantités naturellement présentes dans les eaux, généralement moins de 0,1 mg/l, et suffisent largement à nourrir l'eutrophisation. Ce bassin a tout naturellement été choisi pour étudier l'enrichissement du sol en phosphore et son transport potentiel sous forme adsorbée à partir de l'érosion des sols. Nous présentons, ici, les résultats de la campagne menée au printemps 1995 pour suivre le devenir de ce bassin versant.

Sa contribution à l'eutrophisation va donc devenir d'autant plus forte que les autres sources de phosphore sont en voie de réduction.

Le phosphore rentre dans l'activité agricole sous forme d'engrais et sous forme d'aliment du bétail. La part du phosphore des aliments qui n'est pas valorisée par les animaux (de l'ordre de 70 à 80 %) se retrouve dans les déjections. Celles-ci sont épanchées comme fertilisant sur les terres au même titre que les engrais. L'augmentation du cheptel ren-

Philippe Comlan
Cemagref
17 avenue de Cucillé
35044 Rennes

Encadré 1

Le problème du phosphore dans le Morbihan

Les pertes économiques que génère cette eutrophisation sont lourdes. Les touristes fuient les rivages pollués en raison de l'aspect des plages et des odeurs dégagées. Le ramassage des ulves déposées sur les plages coûte deux millions de francs par an dans le seul département des Côtes d'Armor et ce ramassage n'est que partiel. La mortalité des poissons en mer consécutive à la désoxygénation des eaux à la suite du bloom de phytoplancton a fortement touché la pêche de toute la côte sud de la Bretagne (accident du Mor Bras en 1983). En rivière, la mortalité de poissons est plus localisée mais très fréquente. Les mauvais goûts de l'eau distribuée à la population à partir des retenues d'eau eutrophisées nécessitent des traitements complémentaires et les opérations de filtration de l'eau sont ralenties en raison du colmatage plus rapide des filtres.

De plus, certaines des souches de cyanobactéries qui se développent ainsi dans les retenues produisent des toxines, toxines diarrhéiques ou toxines paralysantes, qui peuvent constituer une menace grave pour la santé publique.

Il importe donc de lutter contre cette eutrophisation des eaux, en général, pour s'affranchir de ces conséquences dommageables du développement excessif des végétaux aquatiques. Les procédés de destruction de cette végétation sont coûteux et requièrent l'épandage dans l'eau de produits, tels que le sulfate de cuivre dans le meilleur des cas dont il est préférable de limiter l'usage.

La réduction des apports de sels nutritifs au milieu aquatique apparaît donc indispensable. En effet, ces proliférations de végétaux aquatiques sont de plus en plus fréquentes, de plus en plus répandues durent de plus

en plus longtemps depuis que les concentrations en éléments nutritifs ont augmenté dans l'eau de manière très importante.

Les eaux des cours d'eau et des retenues sont tellement enrichies en azote que le phosphore est dans, presque tous les cas le facteur limitant de la croissance des populations végétales dans les eaux françaises et, en Bretagne, la charge en nitrate est particulièrement forte dans toutes les eaux douces. Ce n'est donc qu'en réduisant les apports de phosphore que l'eutrophisation pourra être jugulée.

En mer, si l'azote est généralement le facteur limitant de l'eutrophisation littorale, les deux éléments peuvent être facteur limitant dans les cas d'eutrophisation phytoplanctonique observés au large. En baie de Vilaine, en 1982, c'est le phosphore qui était le facteur limitant. (Quéguiner *et al.*, 1986).

Ce phosphore provient, pour une petite part, des rejets de quelques activités industrielles, des industries agro-alimentaires notamment dans l'ouest de la France, mais il provient surtout de rejets des activités domestiques résultant du métabolisme humain et de l'utilisation de produits lessiviels et pour une part notable de rejets agricoles. La réduction des rejets de phosphore d'origine industrielle et domestique par l'adaptation et l'amélioration des stations d'épuration a commencé. Des stations de déphosphatation fonctionnent déjà et toutes les villes sont désormais tenues de s'en doter. Le phosphore d'origine agricole parvient, quant à lui, au réseau hydrographique surtout sous forme diffuse. Il n'est donc pas possible de le traiter dans des stations d'épuration.

forcée par l'utilisation d'aliments de plus en plus riches a débouché sur une production croissante du phosphore ainsi épandu comme fertilisant. Une certaine réduction des quantités de phosphore minéral épandues a aussi été observée, mais elle ne compense pas l'augmentation d'épandage de phosphore organique.

Les apports de phosphore sur les parcelles cultivées dépassent largement les exportations par les cultures. Le phosphore étant très facilement adsorbé sur les sols, l'excédent reste fixé au sol et enrichi donc celui-ci. Les départs de phosphore vers l'eau se produisent essentiellement sous forme solide, à la suite des pluies qui génèrent du ruis-

sellement et de l'érosion (Cann, 1990). En dehors des épisodes de crues, les eaux sont claires et très peu chargées en phosphore. Ces départs ne représentent que des quantités minimales par rapport aux excédents des apports. Le déséquilibre du bilan en phosphore se traduit donc par une accumulation de phosphore dans les sols au fil des années.

L'observatoire lisiers du Finistère a ainsi montré que la teneur moyenne en phosphore des sols de 60 parcelles est passée en 20 ans de 450 mg/kg à 900 mg/kg (dosage par la méthode Dyer) (Verres, 1996). La vitesse moyenne d'accumulation varie entre 14,4 mg/kg et 27 mg/kg.

Le support d'étude : le bassin versant du Coët-Dan

L'étude menée au cours du printemps 1995 a porté sur le suivi d'un nombre restreint de parcelles du bassin expérimental du Coët-Dan. Le bassin versant correspond à l'unité fonctionnelle du territoire permettant d'appréhender aisément les différents processus d'acheminement des éléments physiques ou chimiques au cours d'eau.

La structure géologique du bassin est typique du Massif Armoricain. Le sous-sol est constitué de schistes primaires briovériens en sa partie centrale par une inclusion de grès. L'activité de ce bassin de référence est exclusivement agricole. L'industrie y est pratiquement absente et les sols consacrés à l'agriculture représentent 92 % de la superficie totale.

Depuis quelques décennies, cette activité s'est intensifiée en particulier avec l'élevage. Rapidement, le maïs, les céréales, puis les légumes se sont développés au détriment des prairies permanentes qui ne représentent plus à l'heure actuelle que 20 % des surfaces agricoles.

Le suivi a porté sur l'étude de cinq parcelles du bassin : Guérisouet terre, Guérisouet prairie Kerjean, Kermabevin et Coët-Dan (tableau 1 et figure 1).

Echantillonnage et méthode d'analyse

■ Echantillonnage

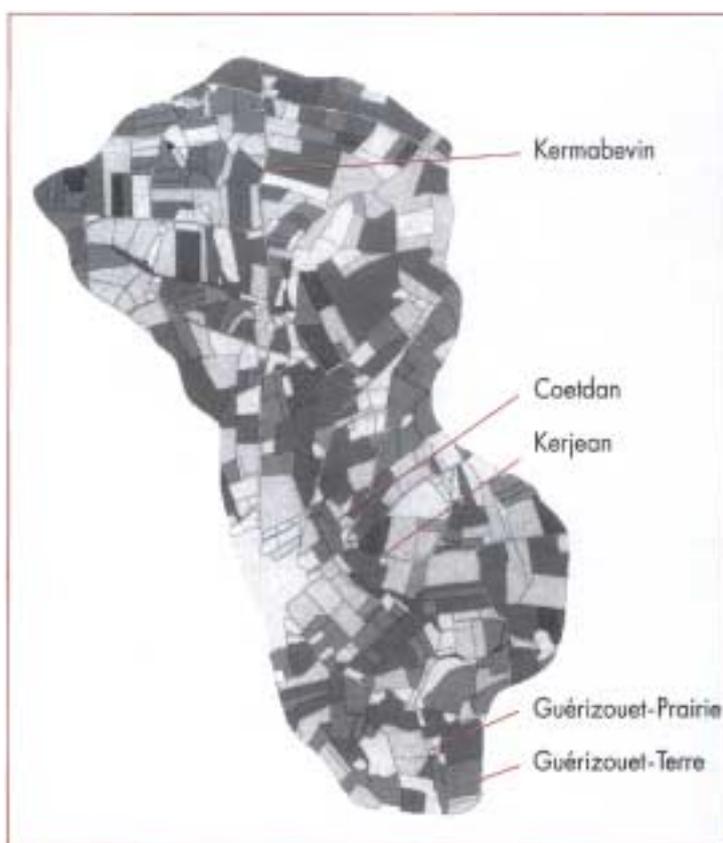
La méthode retenue a été celle des transects.

Elle nous a permis d'étudier les différents transferts du phosphore dans le premier horizon du sol de manière identique pour chaque parcelle, l'objectif étant de suivre les deux phénomènes importants que sont le lessivage et le ruissellement de cet élément.

Sur chaque parcelle, les échantillons ont été prélevés suivant trois transects disposés dans le sens de la pente, pour le ruissellement. Sur chaque transect, il a été défini quatre points de prélèvement espacés d'environ 50 mètres (A, B, C, D). A chaque point de prélèvement, quatre carottages ont été effectués à différentes profondeurs : en surface, à 20, 40, 60 cm pour le lessivage (figure 2).

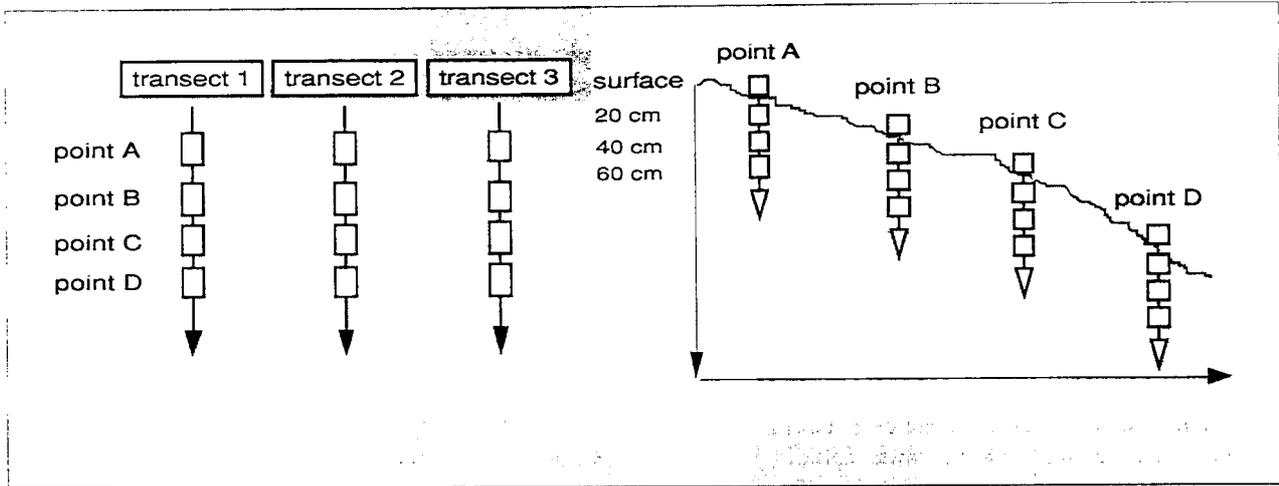
■ Analyses

Le dosage du phosphore total a été effectué par la méthode utilisée par voie sèche (méthode spectrophotométrique). C'est l'application de la méthode AFNOR (NFV 18-106) : le phosphore total est déterminé sur chaque échantillon de terre broyée après séchage à l'étuve à 105°C, puis minéralisé. La solution obtenue a ensuite été traitée par un réactif vanado-molybdique, puis mesurée par spectrophotométrie à 430 nm.



▲ Figure et tableau 1 ▼ - Répartition parcellaire des sols sur le bassin. INRA-Rennes (1992)

Nom de parcelle	Superficie en ha	Pente moyenne en %
Guérisouet terre	7,5	6
Guérisouet prairie	1,7	7
Coët-Dan	2,5	6
Kerjean	3	5
Kermabevin	8	1



▲ Figure 2. - Méthodologie des transects.

Rappel des différentes formes de phosphore rencontrées dans les sols agricoles

On constate habituellement que la biodisponibilité du phosphore est liée à sa forme physico-chimique (particulaire ou soluble, minérale ou organique). Le phosphore total se trouve dans le sol sous trois formes distinctes :

Dans la solution du sol sous forme dissoute...

Il s'agit d'ions solubles, mobiles et donc facilement utilisables par les plantes. Cette fraction faiblement représentée, comprend en majorité des ions orthophosphates. La forme de ces ions (figure n°3) dépend alors du pH et est aisément analysable au laboratoire.

Adsorbée sur l'argile et l'humus...

Le phosphore est fixé sur l'argile, l'humus, les calcaires fins et s'échange facilement avec la solution du sol (figure n°4). En effet, le complexe argilo-humique permet une adsorption réversible du phosphore, ce qui limite les pertes par lessivage et donc le risque de contamination pour les eaux souterraines. Ce phosphore reste mobilisable par la plante et cette adsorption (qui évite la précipitation du phosphore dans le sol sous des formes insolubles) est un mécanisme régulateur dans le cycle du phosphore.

Insoluble ou peu soluble...

Il est constitué de phosphates minéraux insolubles à l'état moléculaire, phosphates de calcium et apatites en terres calcaires, phosphates cristallisés de fer et d'alumine en sols acides. Ils représentent une réserve de fond quasi inutilisable directement, mais qui libère lentement des formes dissoutes utilisables. Les processus de libération sont complexes : ils comportent des phénomènes de précipitation, de solubilisation en fonction du pH, d'adsorption sur les argiles et le complexe argilo-humique, ainsi que des processus microbiens.

Afin de suivre l'hétérogénéité de l'échantillon prélevé, une trentaine de doublons, soit 10 % des échantillons totaux, ont été simultanément traités par le laboratoire départemental d'analyses agricoles de Combourg. L'écart-type moyen constaté était de 9 à 10 % entre notre laboratoire et celui de Combourg, ce qui représente une variation peu importante compte tenu de l'unicité de la prise d'essai.

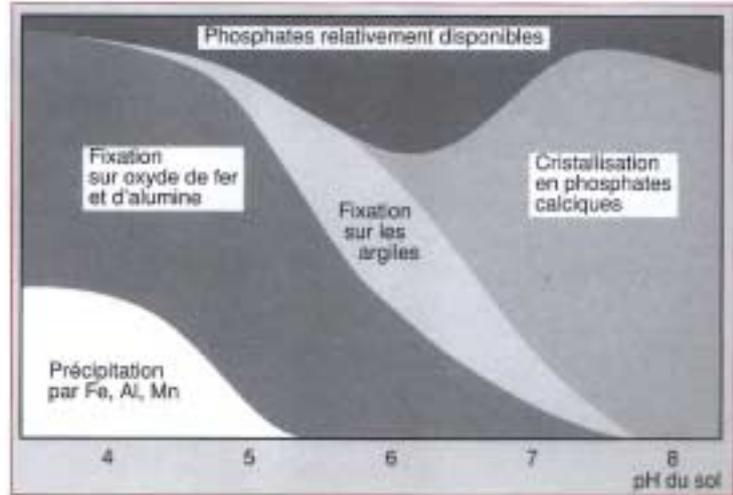
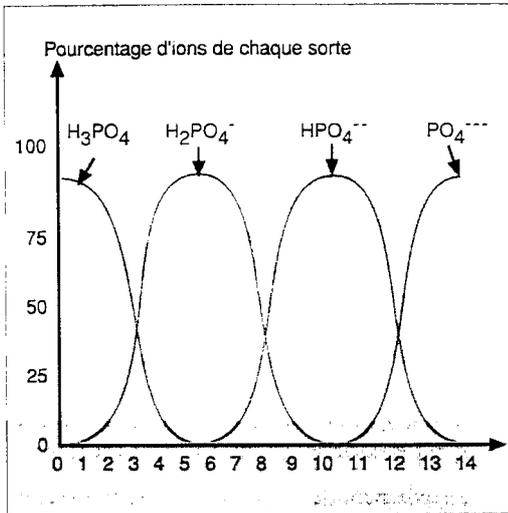
Observations et discussion des résultats : influence de deux phénomènes physiques sur la teneur en phosphore

■ *Le lessivage*

Ce phénomène traduit la migration d'un élément à travers le sol, de la surface vers la roche mère sous l'effet de l'eau des pluies s'infiltrant dans le sol.

La migration a été étudiée pour chaque parcelle le long de chaque transect. Pour cela, j'ai comparé les teneurs en phosphore total à différentes profondeurs (figure 5).

Les teneurs observées dans les échantillons de surface révèlent des concentrations maximales comprises entre 1500 et 2000 ppm. Celles-ci diminuent rapidement avec la profondeur jusqu'à 60 cm pour se stabiliser autour de 600 ppm. A cet endroit, les valeurs rencontrées ont été les plus faibles. Nous avons également rencontré une structure schisteuse du sol plus résistante en feuillet. Sur d'autres transects, cette structure était atteinte avant 60 cm. Une des hypothèses retenue conduit à penser que



les valeurs obtenues à 60 cm sont souvent proches de celles des produits d'altération de la roche mère.

Les teneurs naturelles sur sols non fertilisés sont bien souvent plus proches de 600 ppm, le surplus observé provenant de l'enrichissement par les fertilisants d'origine organique et minérale. L'hétérogénéité des teneurs de surface traduit les différences de fertilisation des diverses parcelles.

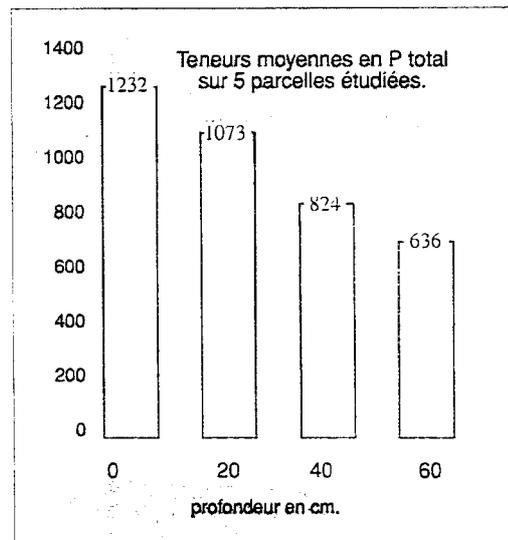
■ **Variabilité des résultats obtenus**

Aux profondeurs intermédiaires, les concentrations étaient également intermédiaires mettant ainsi en évidence la migration du phosphore jusqu'à 20 et 40 cm.

A 20 cm, nous avons plusieurs fois relevé des concentrations élevées proches de celles de la surface, la présence de paliers à 40 cm puis une décroissance de nature moins importante entre 40 et 60 cm. Le figure 6 illustre ce cas rencontré, notamment en bas de la parcelle de Coët-Dan.

Le travail du sol en est la principale cause, notamment le labour. L'horizon de surface se retrouve alors en profondeur. Cette forme de variation ne s'observe pas sous prairies.

Si l'on écarte les problèmes d'hétérogénéité de la parcelle, on observe un phénomène d'érosion et de dépôt le long de celle-ci. Les particules de terre plus légères se retrouvent entraînées en bas de pente, formant ainsi un glaçage souvent observé sur les routes et chemins avoisinants lors de violents événements pluvieux. Certaines explications restent

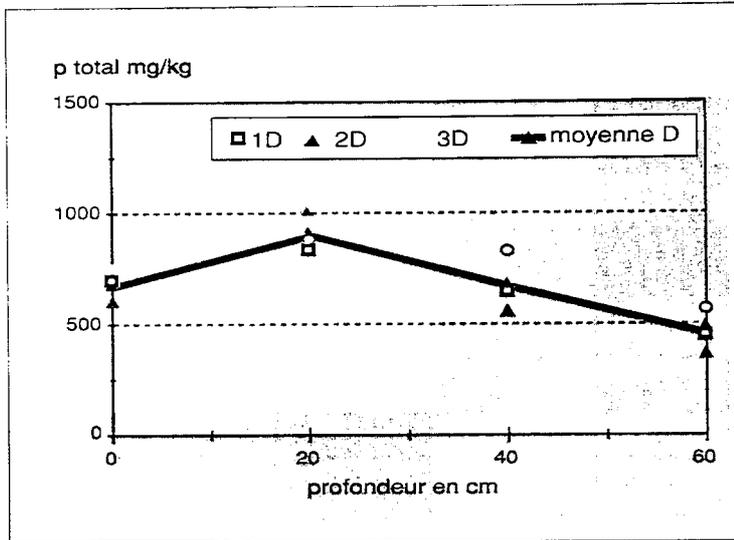


◀ Figures 3 et 4. ▲ - Evolution des formes du phosphore en fonction du pH.

◀ Figure 5. - Moyenne établie sur les résultats de 60 points de prélèvement

à vérifier, notamment l'altérabilité accrue de la roche mère par endroits (zones de bas-fonds) susceptible de relarguer du phosphore (figure 7).

Sur 80 % des carottes prélevées, la teneur en phosphore diminue avec la profondeur. Cette diminution du phosphore s'explique par son aptitude à se fixer sur les particules du sol. Une majeure partie de celui-ci se trouve sous forme particulière ; sous forme de polyphosphates ou complexée au fer et à l'aluminium, soit comme hydroxydes, soit par des forces de type Van Der Waals. La majeure partie du phosphore étant lié, il est peu lessivé. C'est pourquoi sa teneur diminue dans les couches inférieures du sol.

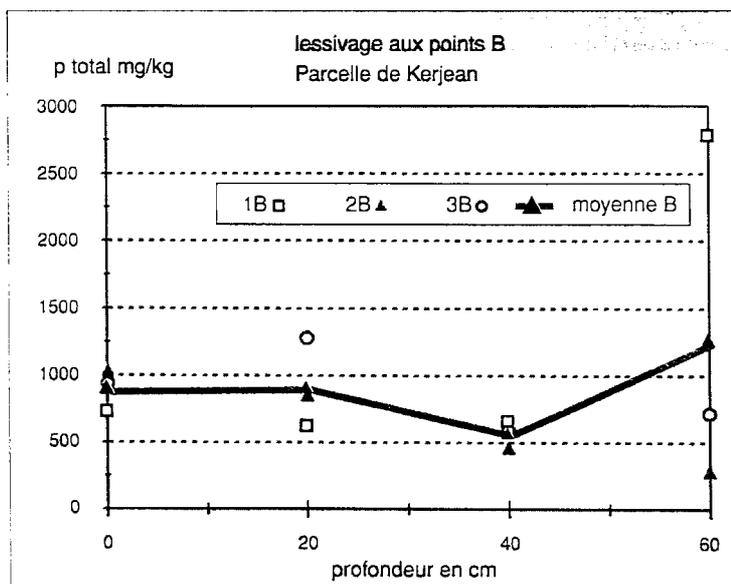


▲ Figure 6. - Migration de phosphore entre 20 et 40 cm en bas de la parcelle de Coët-Dan. lessivage aux points D

Figure 7. - Alterabilité accrue de la roche mère par endroits susceptible de relarguer du phosphore dans la parcelle de Kerjean après lessivage aux points B ▼

En conclusion, le lessivage existe. Les quantités de phosphore lessivé restent faibles, mais ne doivent pas être négligées, car on constate presque toujours un gradient entre 40 et 60 cm. Cet enrichissement date d'environ 40 ans, ce qui correspond à une vitesse du front de migration de l'ordre d'un centimètre par an.

Une étude menée au printemps 1993 au Cemagref de Rennes sur la sédimentométrie du plan d'eau de Naizin (C. Szenknect) a pu révéler dans les sédiments, des concentrations de phosphore total trois fois supérieures à celles des sols cultivés. Nous



avons constaté au cours de cette période, dans ce plan d'eau, des quantités sédimentées de l'ordre de 1000 kg pour 30 jours lors d'événements pluviométriques importants.

■ Le ruissellement

Les départs de phosphore d'origine agricole s'effectuent uniquement lors des crues, lorsque les eaux de ruissellement amènent des particules de sol et des déjections chargées en phosphore au ruisseau. Les plus grosses et les plus lourdes d'entre elles tombent plus vite et ne sont donc déplacées que sur des courtes distances. Ce phénomène paraît n'être visible qu'en surface ou à faible profondeur. Il dépend essentiellement des variations de la pente.

Le ruissellement de surface a été suivi en fonction de l'importance de la pente et de sa forme. En tenant compte de la concavité et de la convexité de chaque pente, il est possible de mieux comprendre les départs de phosphore à chaque point du transect.

Les départs et les arrivées de phosphore aux différents points étudiés (A, B, C, D) sont matérialisés plus bas par des flèches sur les figures n°8 et 9.

Les parties convexes de la pente sont plutôt des sites d'érosion et les parties concaves des sites de dépôt. Le transfert par ruissellement de sol enrichi devrait se traduire par des teneurs supérieures dans les parties concaves et des teneurs plus faibles dans les parties convexes de la pente.

■ L'effet pente

Afin de mettre en évidence l'effet pente, il a été calculé la moyenne des concentrations de tous les points de surface. Les valeurs moyennes de surface en A, B, C, D ont ensuite été comparées à la concentration moyenne de la parcelle représentée par une droite. Les figures 8 et 9 représentant Kermabevin et Kerjean illustrent en simplifiant les deux phénomènes les plus fréquemment observés attribués à l'effet pente.

La parcelle de Kermabevin a une pente de 1 % en moyenne. On constate sur la figure n°8 que l'enrichissement est quasi nul sur les transects, puisque les teneurs moyennes en chaque point sont presque égales à la moyenne des teneurs en phosphore de tous les points de surface.

La parcelle de Kerjean a une pente moyenne de 5 %. Il y a un enrichissement régulier du haut de

la pente jusqu'en bas. Soumise à un travail du sol intensif, cette parcelle montre bien l'importance du ruissellement (figure 9).

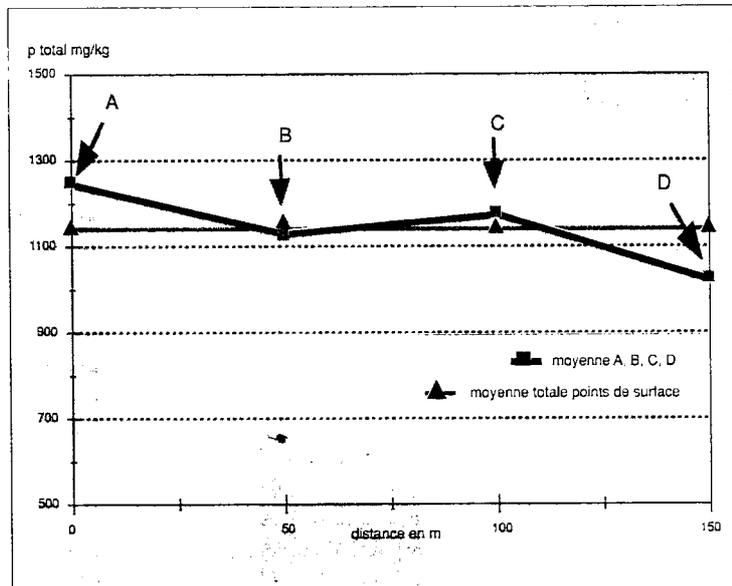
La combinaison des deux phénomènes s'observe sur 12 transects sur 15 en confirmant les hypothèses émises. On constate généralement un enrichissement des sols supérieur en phosphore en bas de pente à celui constaté en haut de pente et cette différence est d'autant plus nette que la pente est forte. D'autre part, la forme de la pente joue aussi un rôle. L'enrichissement se manifeste plus au niveau des zones concaves que dans les zones convexes. Toutefois, quelques résultats dérogent à ces règles sans que nous ayons pu les interpréter et il n'a donc pas été possible de quantifier ces transferts de manière rigoureuse.

Conclusion

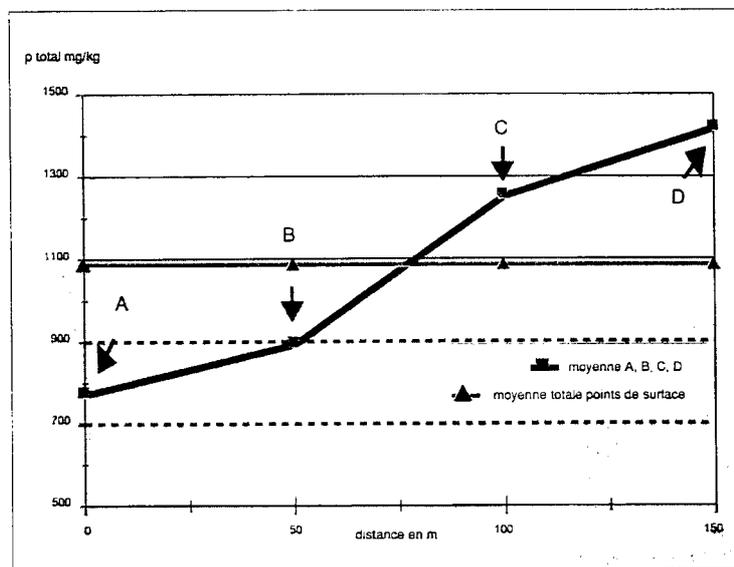
Les résultats obtenus au cours de notre étude en 1995 sur les sols viennent ainsi conforter certaines hypothèses émises sur le déplacement du phosphore à l'échelle de la parcelle. Ces observations concernent le phénomène d'enrichissement du phosphore organique et minéral en surface, équivalent à deux fois les teneurs présentes à 60 cm. Cette première approche permet également de constater l'existence d'un faible lessivage du phosphore, qui migre plus souvent sous forme particulaire et se retrouve peu présent en profondeur. Sa présence régulière le long de la carotte traduit, toutefois, la pratique de 40 ans d'apports de phosphore amendé.

La pente de la parcelle n'intervient pas dans le lessivage, mais en revanche influe beaucoup sur le phénomène de ruissellement, la structure du sol étant souvent fragilisée par un fréquent travail superficiel. La topographie de la parcelle, notamment les zones concaves et convexes, accentue respectivement les départs et les arrivées de phosphore en chaque point.

Il reste difficile d'apprécier avec justesse l'ensemble des résultats observés, puisque certaines teneurs n'affirment pas toujours les hypothèses émises. Une étude plus exhaustive des paramètres cultureux, des bilans nous aurait permis de mieux comprendre ces deux transferts.



▲ Figure 8. Teneurs moyennes en mg/kg de P total et coupe schématique du profil moyen des trois transects de la parcelle de Kermabevin.



▲ Figure 9. Teneurs moyennes en mg/kg de P total et coupe schématique du profil moyen des trois transects de la parcelle de Kerjean.

Résumé

Les quantités de phosphore susceptibles d'affecter la qualité des eaux sont si faibles en rapport aux quantités manipulées par l'industrie agricole, qu'une simple augmentation dans les eaux de rejet peut avoir des conséquences en matière d'eutrophisation. L'observation ponctuelle du phosphore total le long de 15 transects du bassin versant du Coët-Dan, a permis d'établir un premier constat : les résultats obtenus reflètent l'existence d'apports importants en surface, puisque les teneurs sont deux fois supérieures à celles trouvées à 60 cm. On constate un faible lessivage du phosphore qui migre sous forme particulaire dans les premiers centimètres du sol. La pente de la parcelle intervient dans le phénomène de ruissellement comme l'ont montré les différents profils étudiés. On note une accumulation constante du phosphore dans l'eau de ruissellement. Ces observations devraient permettre la mise en évidence du transfert de ce nutriment de la parcelle au proche cours d'eau.

Abstract

By analysing total phosphorus along 15 soils cross-sections in 5 parcels of a Brittain experimental water basin, we resulted in two verifications. The first one confirms, that total phosphorus retention in surface increase more than at 60 centimeters deeper. Buffering capacity in the 20 first centimeters of cultivated soil move from 1000 up to 2500 mg of total phosphorus per kg of soil : we observed that phosphorus adsorption can't easily reach 60 cm deep. A small part of it, especially polyphosphates correlated with aluminium and iron oxides, is supposed to move down. However we measured small quantities of phosphorus at 40 and 60 cm, that shows leaching exists, but in low contribution. The second and most important point, is about the runoff. Different notes shows us that the parcel slope has an effect on phosphorus accumulation in water during rainfalls. Particles of soil, move across the slope on short intervals. We observed these resettlements for 9 cross-sections nearby the Coët-dan stream.

Bibliographie

- BONZONGO, J.-C.-J., 1990. Phosphore et sédiments. Méthodes d'analyse, Stockage, Relargage, Biodisponibilités, *Thèse Université de Rennes I*, 116 p.
- CANN, C., 1990. Transfert du phosphore d'une zone d'élevage intensif vers les eaux, Cemagref Rennes, 87 p.
- MARTIN, G., Phosphore dans les Eaux, ENSC Rennes.
- MOREL, C., TIESSEN, H., MOIR, J.-O., and STEWART J.-W.-B., 1994. Phosphorus transformations and availability under cropping and fertilization assessed by isotopic exchange, *Soil Science Society of America Journal* 58, n°5, p1439-1445.
- PERSPECTIVE AGRICOLE, 1988. Fertilisation du phosphore et potasse, *Revue ITCF*, n°127, juillet-août 1988, 266 p.
- QUEGUINER, *et Al*, 1986. Laboratoire de Chimie et de Modélisation Des Cycles Naturels de l'Ifremer de Brest, *Rapport d'étude*.
- QUEMENEUR, G., 1987. Dynamique du phosphore sur un Bassin Versant Expérimental en Région d'élevage intensif, *Mémoire ENGEES*, Cemagref Rennes, 100 p.
- SAJUS, P., 1992. Etude de la dynamique du phosphore au sein d'un Bassin Versant, *Synthèse bibliographique*, Cemagref Bordeaux, 32 p.
- SAURON, I., 1995. Mobilité du phosphore à l'échelle d'un bassin versant, *Mémoire IUT de Brest option Biologie Appliquée*, 20 p.
- SZENKNECT, C., 1993. Impact d'une retenue sur les transferts de solutés et de matière en suspension, Etude menée sur le bassin versant expérimental de Naizin, *Mémoire ENSA de Rennes*, 58 p.
- VERTES, F., 1995. Accumulation en phosphore et métaux lourds dans les sols d'exploitations d'élevage intensif en Bretagne occidentale, *Ingénieries-EAT*, hors-série « La rade de Brest », 133 p.