

# Accumulation en phosphore et métaux lourds dans les sols d'exploitations d'élevage intensif en Bretagne occidentale

Françoise Vertes

La baisse des ressources halieutiques en rade de Brest, indicatrice d'une dégradation de la qualité des eaux de la rade, a entraîné l'élaboration d'un programme de recherches marines et terrestres visant à caractériser les origines et les transferts de polluants sur le bassin versant de l'Elorn, puis leur impact sur le milieu marin. Les parcelles agricoles cultivées de façon intensive sont à l'origine de certaines pollutions retrouvées dans les eaux : lessivage d'éléments solubles comme le nitrate, entraînement par érosion des éléments non solubles alimentant les sédiments, accumulation dans les sols de minéraux et métaux peu mobiles.

L'accumulation de phosphore et de métaux lourds (Cu et Zn en particulier) apportés en grande partie par les lisiers est suivie depuis 20 ans dans un réseau de 180 parcelles réparties dans tout le département (« Enquête Lisier », Coppenet *et al.*, 1993). 60 sont dans le bassin versant de la rade *stricto sensu* et la diversité des parcelles suivies recouvre l'ensemble des caractéristiques des parcelles agricoles de la rade. Ce réseau constitue un observatoire des évolutions chimiques des sols soumis à des épandages plus ou moins importants de lisiers et/ou engrais (analyses chimiques tous les trois ans).

Coppenet *et al.* (1993) a caractérisé les enrichissements des sols en  $P_2O_5$  (Dyer Demolon), Cu et Zn (EDTA) qui sont respectivement de + 28, + 0,22 et + 0,37 ppm/an sur les 15 premières années. Cet auteur relie essentiellement cet enrichissement aux apports de lisier.

Peut-on dégager des trajectoires d'évolution des sols en fonction des deux types de caractéristiques dis-

ponibles : rotations culturales et pratiques de fertilisation ? Cet article fait le point des données existantes (Faou, 1994) et fournit un référentiel permettant de caler les observations réalisées par d'autres équipes (Delmas, même ouvrage ; Turpin *et al.*, même ouvrage).

## Matériel et méthodes

Des bilans de minéraux réalisés à l'échelle de l'exploitation par Coppenet (1975, 1993) ont fait pressentir, dès le début de l'intensification des élevages bretons, le risque d'accumulation de minéraux dans les sols agricoles recevant de fortes quantités de déjections animales. Un réseau de 64 exploitations représentatives des élevages intensifs et de la diversité pédoclimatique du Finistère a été choisi pour mettre en évidence les modifications chimiques éventuelles de la couche arable des sols cultivés.

Dans chaque exploitation, trois parcelles ont été choisies en fonction des assolements pratiqués. Elles ont fait l'objet de prélèvements tous les trois ans depuis 1973 par les services techniques de la Chambre d'Agriculture du Finistère, les analyses de terre étant réalisées à la Station d'Agronomie de Quimper. Les agriculteurs ont rempli en même temps une fiche de renseignements indiquant pour chaque parcelle les cultures pratiquées et les apports de fertilisants organiques (lisiers ou fumiers) et minéraux ainsi que les amendements calcaires. L'estimation des quantités de minéraux ou métaux apportés est basée sur les normes CORPEN elles-mêmes issues en grande partie des analyses de déjections réalisées à Quimper. Au total 186 par-

**Françoise Vertes**

INRA

Station d'Agronomie,  
4, rue de Stang Vihan  
29000 Quimper

celles ont été suivies depuis 20 ans, les échantillons de sols étant tous conservés.

Les analyses chimiques effectuées concernent : l'acide phosphorique ( $P_2O_5$  citrique méthode Dyer-Demolon), la potasse échangeable (acétate d'ammonium), le cuivre et le zinc EDTA. Étaient également déterminés le pH (eau), les teneurs en azote et carbone total afin de suivre l'évolution de la teneur en matière organique et du rapport C/N.

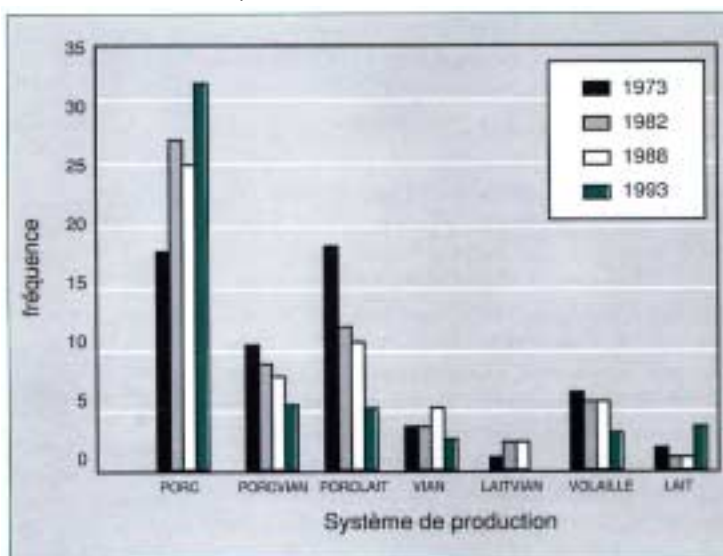
Ces analyses portent sur l'horizon cultivé (mélange de 15 sondages prélevés au hasard dans une zone définie initialement) et sur le sous-sol en 1979 et 1993. La dernière campagne de prélèvements et d'analyses a eu lieu au cours de l'hiver 1993-94.

Les analyses statistiques de l'ensemble des données disponibles sur les parcelles ont été faites sur le logiciel Statgraphics (Uniware).

### L'évolution des systèmes de production

La figure 1 illustre l'évolution sur 20 ans des systèmes de production des 64 exploitations (réduites à 57 lors de la campagne de 1993). Une spécialisation porcine des élevages s'est affirmée dès la fin des années 70 et dans l'échantillon suivi trois fermes seulement sont en production laitière pure en 1993.

Figure 1. - Évolution des types de productions de 1973 à 1993 dans les 64 exploitations du réseau de l'enquête « lisier » ▼



Pour l'ensemble des troupeaux laitiers (dix exploitations en 1993), les chargements animaux sont modérés (de 0,7 à 1,5 UGB/ha sauf une ferme à 2,1 UGB/ha) avec des quotas élevés : de 190 000 à 660 000 litres lait/an. En production porcine, le nombre de porcs produits varie entre 25 et 500 porcs produits/ha/an, 90 % des élevages ayant une production inférieure à 200 porcs/ha/an. Ces chiffres sont ramenés à l'hectare de l'exploitation et non à l'hectare du plan d'épandage.

Les surfaces agricoles utiles (SAU) augmentent fortement depuis 1988, avec 18 exploitations de plus de 60 ha en 1993 contre cinq seulement en 1988. La SAU moyenne est passée de 20 ha en 1973 à 38,6 ha en 1988 et 55,3 ha en 1993, tendance observée sur l'ensemble du département dans les élevages intensifs. Cet accroissement des surfaces permet une diminution de la pression d'épandage.

Les cultures et rotations pratiquées ont légèrement évolué au cours du temps (figure 2), avec une fréquence accrue de la rotation maïs-céréales au détriment de la monoculture de maïs et de la rotation maïs-prairies. Ces rotations et leur évolution sont typiques des élevages hors sol ou mixtes. La catégorie polyculture recouvre essentiellement trois types de rotations : maïs ou betterave - blé ou orge - ray grass d'Italie, chou-fleur - orge et maïs - blé - colza. Son augmentation en 1993 reflète la diversification des productions depuis la fin des années 80.

### L'évolution des fertilisations organique et minérale (phosphore) des parcelles

Les apports de déjections animales (lisier et/ou fumier) varient entre 0 et 250  $m^3/ha/an$ . Concernant les seuls lisiers, les apports moyens passent de 40 à 70  $m^3/ha/an$  de 1973 à 1982 et après une période stable chutent à 30  $m^3/ha/an$ . Rappelons que la Directive Nitrates limite l'épandage à 210 kg N/ha/an (170 à l'échéance de l'an 2000) soit une quantité de lisier de l'ordre de 40 à 60  $m^3/ha$ .

L'augmentation des SAU et la généralisation des plans d'épandage expliquent la décroissance de 1988 à 1993. Pendant la même période, les bilans d'azote réalisés à l'échelle de l'exploitation (Simon *et al.*, 1992) sur 36 exploitations indiquent que la charge potentielle d'azote par ha est passée de 430 ( $\pm 215$ ) à 305 ( $\pm 180$ ) kg N/ha/an (résultats non publiés).

On constate une grande variabilité de fertilisation organique des parcelles sans relation avec les cultures et rotations pratiquées. Seule la moyenne des quantités apportées sur prairies est supérieure de 20 % à celle des autres rotations mais la variabilité intra-rotations est très supérieure à la variabilité inter-rotations. Ces résultats confirment le fait que, dans la plupart des parcelles d'exploitations d'élevage intensif, il s'agissait plus de vider les fosses à lisier sur des cultures supportant des apports élevés (dont le maïs, certains légumes et les céréales en automne) que de fertiliser des cultures selon leurs besoins. Ce déséquilibre explique les problèmes de pollution actuels.

En considérant les seuls apports de phosphore, on constate (figure 3) que la part des engrais a diminué au cours du temps tandis que celle des fumiers est relativement stable. On observe la forte chute des apports de phosphore par les lisiers de 1988 à 1993 liée à l'extension des surfaces d'exploitation et des plans d'épandages.

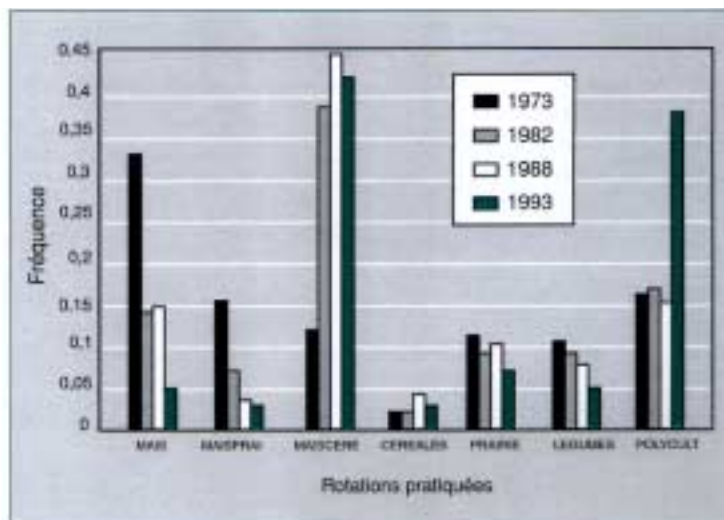
Une classification des parcelles suivies en 1993 a été réalisée sur la base des quantités épandues en 22 ans (les enquêtes réalisées en 1973 concernaient les années 1971 à 73). Le tableau 1 indique les classes, les effectifs de parcelles, les quantités moyennes de déjections reçues et les apports cumulés d'engrais phosphatés (en kg P/ha/22 ans).

Tableau 1. - Classification des parcelles en fonction des quantités de déjections et d'engrais phosphatés reçues de 1971 à 1993 : moyenne des quantités apportées (écart-type). ▼

Classe t/ha/22 ans	Effectif	Déjections t/ha/22 ans	Engrais P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> kg P/ha/22 ans
1 (0-800)	19	690 (101)	1 530 (660)
2 (800-1 200)	55	978 (152)	968 (465)
3 (1 200-1 600)	45	1 340 (132)	790 (541)
4 (1 600-2 000)	29	1 705 (147)	608 (450)
5 (2 000-2 500)	17	2 206 (178)	788 (491)
6 (2 500-4 500)	9	3 373 (362)	393 (329)

La première classe (0-800 t/ha) correspond à des apports moyens annuels de 0 à 35 t/ha/an, les classes 2, 3, 4, 5 et 6 à des apports respectifs annuels de 35-52, 52-70, 70-87, 87-109, > 110 t/ha/an.

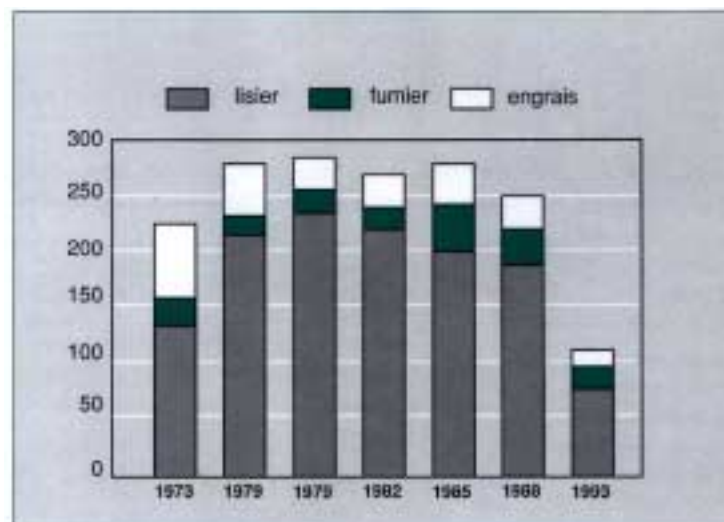
La relation statistique négative entre apports de déjections et apports d'engrais phosphatés est nette lorsque l'on considère les cumuls sur 20 ans. Les

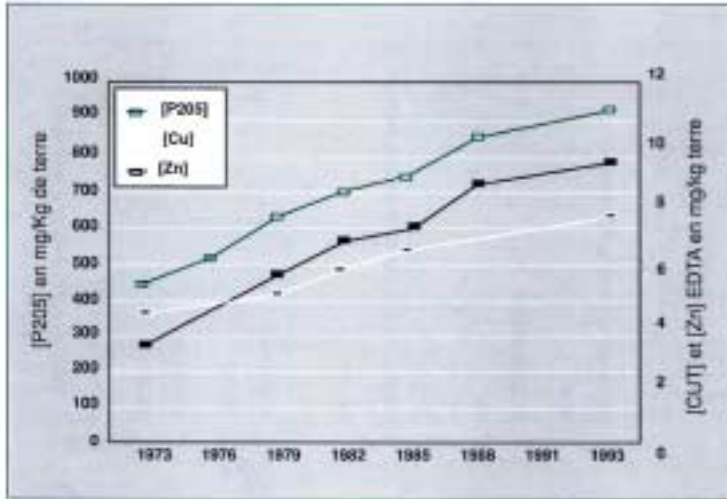


▲ Figure 2. - Évolution des rotations culturales pratiquées sur les 180 parcelles de 1973 à 1993 du réseau de l'enquête « Lisier » (exprimées en fréquence) : monoculture de maïs, maïs-prairies, maïs-céréales, céréales, prairies, cultures légumières, polyculture

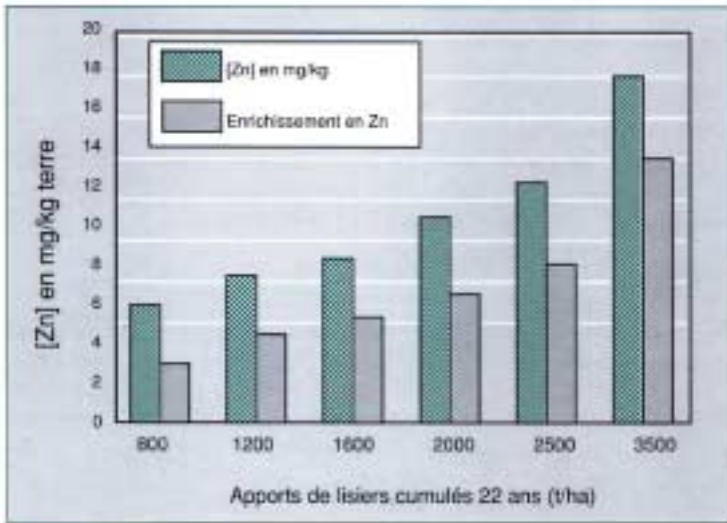
écart-types élevés s'expliquent par certaines parcelles de légumes (dont la pomme de terre) qui reçoivent des engrais solubles en « coup de fouet » et par le conservatisme des pratiques de fertilisation de certains éleveurs peu sensibles aux teneurs élevées en P et K de leurs sols.

Figure 3. - Évolution de 1973 à 1993 des quantités annuelles de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> reçues par l'ensemble des parcelles : part des lisiers, des fumiers et des engrais ▼





▲ Figure 4. – Évolution des teneurs moyennes en  $P_2O_5$  (Dyer), Cu EDTA et Zn EDTA de 1973 à 1993 sur l'ensemble des parcelles



▲ Figure 5. – Teneurs moyennes en Zn EDTA mesurées en 1993 et enrichissement en 20 ans en fonction des apports de déjections cumulé sur la même période (mêmes classes que le tableau 1)

Tableau 2. – Moyenne (écart-type) pour chaque classe d'apports de déjections des teneurs en phosphore, potassium, cuivre et zinc en 1993 et des enrichissements en ces éléments depuis 1973. ▼

Classe	$P_2O_5$ mg/kg terre	$(P_2O_5)$	Cu mg/kg terre	(Cu)	Zn mg/kg terre	(Zn)	$K_2O$ mg/kg terre
1	867 (303)	349 (252)	4,9 (2,4)	1,3 (3,2)	6,3 (3,2)	3,2 (2,9)	435 (104)
2	765 (288)	371 (214)	6,0 (2,2)	2,0 (2,7)	7,8 (3,3)	5,0 (2,8)	368 (119)
3	873 (321)	460 (244)	8,1 (3,1)	4,1 (2,3)	8,8 (3,8)	5,5 (3,5)	413 (132)
4	922 (400)	537 (332)	8,9 (3,0)	4,1 (2,0)	10,5 (3,4)	7,0 (3,6)	489 (160)
5	1 243 (696)	735 (506)	8,1 (2,8)	4,4 (2,2)	12,7 (4,0)	8,5 (3,2)	433 (133)
6	1 565 (258)	1024 (321)	9,4 (2,8)	5,1 (2,1)	18,4 (5,5)	14,1 (6,0)	475 (110)

### L'évolution de la composition chimique des sols

La figure 4 montre pour l'ensemble des parcelles l'évolution sur 20 ans des teneurs moyennes en P, Cu et Zn. Ces évolutions ont été étudiées par Coppenet *et al* (1993), auquel on se reportera. La dernière campagne de prélèvements montre un net infléchissement de la cinétique d'accumulation, due à la réduction des apports : pour P, Zn et Cu les vitesses d'accumulation passent respectivement de 27 à 14,4 mg/kg terre/an, de 0,357 à 0,14 ppm/an et de 0,173 à 0,06 ppm/an. L'infléchissement est particulièrement net pour le cuivre ; plusieurs hypothèses non exclusives sont envisageables : baisse de la teneur en cuivre dans le sol différent de celui de P et Zn (Hadlich, 1993), cuivre EDTA non représentatif de l'accumulation du cuivre total (le cuivre EDTA représenterait 28 à 43 % du cuivre total d'après Hadlich, *op cit*). Des analyses complémentaires seront nécessaires afin de préciser la part des différentes hypothèses.

Le tableau 2 reprend les classes d'apports cumulés définies dans le tableau 1 et indique les teneurs moyennes en 1993 et les enrichissements en P, Cu et Zn en 20 ans. Les teneurs en potassium sont indiquées pour caler l'accumulation des éléments non mobiles par rapport à celle d'un élément plus lessivable.

L'évolution des teneurs en Zn est illustrée sur la figure 5 (les graphiques sont analogues pour  $P_2O_5$  et Cu). Teneurs et enrichissements sont nettement liés aux apports cumulés de déjections et confirment la validité des classes choisies. Il apparaît difficile par contre de relier des évolutions à court terme (trois ou six ans) aux apports correspondants, en raison des problèmes d'échantillonnage lors des prélèvements.

Cependant, lorsque l'on considère l'ensemble des parcelles en 1993, seule la corrélation  $D(\text{Zn})$  - déjections est très significative :

$$D(\text{Zn}) = 0,59 (\pm 0,74) + (\pm 0,03) \\ (\text{Apports cum.}) (r = 0,53),$$

car non perturbée par d'autres sources d'apports comme c'est le cas pour le phosphore. La variabilité des teneurs en P, Zn et Cu au sein des différentes classes d'apports cumulés et l'incertitude concernant ces apports (en quantités estimées par les agriculteurs et avec des teneurs moyennes) explique qu'au niveau des parcelles individuelles les régressions soient relativement médiocres.

### L'analyse globale des relations entre éléments

Une analyse en composantes principales a été réalisée sur l'ensemble des variables chimiques et agronomiques caractérisant les 180 parcelles, afin de préciser la hiérarchie des facteurs discriminant les parcelles ainsi que les liaisons statistiques entre ces facteurs.

Elle confirme l'absence de liaison entre épandage de déjections et culture ou rotation pratiquées. Le premier axe discriminant explique 31 % de la variance et correspond aux teneurs en P, K et Zn, et dans une moindre mesure Mg et Cu. Le deuxième axe (17 % de la variance) correspond à la teneur en matière organique, opposée à la teneur en cuivre et le troisième axe (13 % de la variance) oppose pH et teneur en manganèse. On retrouve de façon diffuse la liaison préférentielle du cuivre à la matière organique bien mise en évidence par des analyses séquentielles sur certains échantillons par Hadlich (1993). On sait d'autre part que des pH élevés induisent des carences en manganèse par insolubilisation dans les sols riches en matière organique (Coic et Coppenet, 1958).

Les apports de lisier participent à la constitution du premier axe mais apparaissent sur cette analyse globale peu corrélés aux teneurs en minéraux.

La matrice des corrélations indique une liaison entre teneurs en  $\text{P}_2\text{O}_5$  et Zn ( $r = 0,72$ ) et  $\text{P}_2\text{O}_5$  et  $\text{K}_2\text{O}$  ( $r = 0,57$ ). Cette dernière traduit l'évolution conjointe des teneurs en P et K, apportés dans les déjections et les engrais minéraux, bien que l'aug-

mentation des teneurs en  $\text{K}_2\text{O}$  des sols soit très inférieure à cause du lessivage de cet élément. La première est particulièrement intéressante :

$\text{P}_2\text{O}_5 = 293,4 (\pm 14,5) + 60,8 (\pm 1,8) \text{Zn}$  ; ( $r = 0,72$ ) et pourrait s'expliquer par la constitution de molécules spécifiques de phosphates de zinc (Xie et Mackenzie, 1990), dont l'étude sera approfondie lors de travaux ultérieurs (ces deux éléments ont d'autre part des coefficients de diffusion très faibles, ce qui peut se traduire par une liaison statistique).

Les relations fonctionnelles apparaissent mal dans cette matrice, masquées par la variabilité des parcelles et leur histoire, par les teneurs élevées liées à des apports massifs de déjections et par le fait que les analyses ne portent pas sur les éléments totaux mais sur la fraction dite « assimilable ».

### Conclusion

L'Observatoire lisier du Finistère apparaît représentatif de l'évolution des sols en exploitation d'élevages intensifs et permet de quantifier les accumulations d'éléments peu mobiles tels le phosphore, le cuivre et le zinc en fonction des apports de déjections animales et de fertilisants minéraux.

Des teneurs très élevées sont constatées pour les trois éléments dans l'ensemble des parcelles, phénomène également constaté par d'autres auteurs (N'Dadegamiye A., 1990 ; Chang *et al.*, 1991). Le rythme d'accumulation devra être caractérisé pour les quantités totales et une enquête complémentaire permettra de tester l'influence de facteurs du milieu non disponibles jusqu'ici (texture des sols, caractéristiques topographiques et situation des parcelles dans le paysage, etc). Ce travail en cours fournira les éléments permettant de mieux comprendre le fonctionnement des sols concernant l'accumulation et les risques de relargage des métaux, et de préciser les trajectoires d'évolution et leur déterminisme.

Il sera alors possible de situer les résultats observés en 1994 - études précises des flux à court terme de différents éléments par le Cemagref, stockage ou déstabilisation des métaux lourds par la Science du Sol - dans une base d'extrapolation fiable à la fois dans le temps (chronique d'évolution des sols unique en Finistère) et dans l'espace.

### Résumé

En Bretagne, les élevages intensifs de bovins, de porcs ou de volailles mettent en jeu des quantités importantes de certains éléments minéraux et métaux. Des bilans à l'échelle de l'exploitation ont montré en particulier des excès importants en phosphore, potassium, cuivre et zinc. Ces éléments sont importés dans les fermes sous forme d'engrais minéraux ou d'aliments pour les animaux, et les excédents modifient l'évolution chimique des sols soumis à des épandages répétés de lisiers.

Un réseau-observatoire de 64 exploitations a été mis en place en 1973 afin d'étudier cet enrichissement prévisible : 180 parcelles (3 par exploitation) ont été observées et analysées tous les trois ans. L'enrichissement en  $P_2O_5$  (Dyer), Cu-EDTA et Zn-EDTA est corrélé aux quantités de lisiers reçues cumulées sur les 20 ans de suivi. Il n'apparaît pas de relations entre les cultures ou rotations et la fertilisation organique, les apports de lisiers étant supérieurs aux besoins des cultures ; néanmoins lisiers et engrais minéraux sont corrélés négativement. Les parcelles ont été regroupées selon les apports de lisier cumulés afin de préciser les trajectoires d'évolution chimique des sols. Des travaux en cours incluant les éléments totaux préciseront les conditions de leur transfert et évalueront les risques de pollution des eaux.

### Abstract

In Brittany (Western France) intensive pig, cattle and poultry breeding involves high amounts of some elements, such as minerals and metals. In particular, theoretical nutrient balance at farm scale level shows important excesses in phosphorus, potassium, copper and zinc. These elements come from chemical fertilizers and animal feed, and excesses affect chemical evolution of soils due to the addition of slurry. To study this enrichment, a survey of 64 breeding farms started in 1973, and 180 fields (3 per farm) were analysed every 3 years. The enrichment in  $P_2O_5$  (Dyer), Cu-EDTA and Zn-EDTA has been correlated to the amounts of slurry spread on soils, cumulated over the past 20 years. There were no relationships between crops species or rotations and organic fertilization, the amounts of slurry being higher than crop requirements. Slurry and mineral phosphates appeared negatively correlated. A classification of fields based on cumulated inputs of slurry was established. Forthcoming analyses on total elements will be carried out to study the conditions of their migration and evaluate the risks of water pollution.

**Key words :** Slurry, Phosphorus, Copper, Zinc, Brittany

### Bibliographie

- CHANG, C., SOMMERFIELD, T.G., and ENTZ, T., 1991. Soil chemistry after eleven annual applications of cattle feedlot manure. *J. Environ. Qual.*, 20 (2), pp. 475-480.
- COIC, Y., et COPPENET, M., 1958. Sur la carence en manganèse des céréales dans les sols humifères de Bretagne. *Annales agronomiques Physiologie végétale*, supplément II, pp. 111-138.
- COPPENET, M., 1974. L'épandage du lisier en porcherie. Ses conséquences agronomiques. *Annales agronomiques*, 25, pp. 403-423.
- COPPENET, M., 1981. Copper accumulation in Brittany soils through enriched pig slurry ; phytotoxic risks. in « *Copper in animals waste and sewage sludge* ». D. REIDEL Publ. Comp., London, pp. 154-161.
- COPPENET, M., GOLVEN, J., SIMON, J.C., LE CORRE, L., LE ROY, M., 1993. Évolution chimique des sols en exploitations d'élevage intensif : exemple du Finistère. *Agronomie*, 13 : pp. 77-83.
- FAOU, V., 1994. Les épandages de lisier en élevages intensifs. Conséquences sur l'enrichissement des sols en phosphore, cuivre et zinc. *Mémoire « Maîtrise de gestion de l'environnement »* U.B.O., 28 p.