

Lessivage d'éléments minéraux autres que l'azote en monoculture de maïs, en sol granitique du Finistère

J.C. Simon et L. Le Corre*

Dans un article précédent, nous avons présenté les pertes en azote nitrique par lessivage en sol granitique du Finistère, dans le cas d'une monoculture de maïs avec ou sans culture dérobée de ray-grass d'Italie (SIMON et LE CORRE, 1988). Dans ce nouvel article, nous nous intéresserons plus particulièrement aux pertes en autres éléments minéraux principaux : chlore, soufre, phosphore, calcium, magnésium, potassium et sodium (respectivement : Cl, S, P, Ca, Mg, K et Na).

Dans le contexte agricole breton, l'intensification de l'élevage s'accompagne d'une production très importante de déjections animales. Ces dernières sont épanchées sur les parcelles agricoles, parfois en très grande quantité, ce qui conduit à un enrichissement du sol en certains éléments (COPPENET et GOLVEN, 1984 ; SIMON et GOLVEN, 1987). Plusieurs interrogations se posent sur le transfert de ces éléments dans les eaux de drainage.

Si l'on ne dispose pas de résultats régionaux de pertes d'éléments minéraux sous les systèmes de culture recevant des déjections animales, l'installation lysimé-

* : avec la collaboration technique de M. GUILLOU et M. LE ROY

MOTS CLÉS

Bretagne, calcium, chlore, culture dérobée, lessivage, magnésium, monoculture maïs, phosphore, potassium, ray-grass d'Italie, soufre.

KEY-WORDS

Brittany, calcium, catch crop, chlorine, italian rye-grass, leaching, magnesium, maize monoculture, phosphorus, potassium, sulphur.

AUTEURS

I.N.R.A., Station d'Agronomie, 4, rue de Stang Vihan, F. 29000 Quimper.

trique de Quimper permet au moins de fixer des ordres de grandeur des pertes par lessivage pour des successions de cultures recevant une fertilisation minérale. Dans le présent article, nous analyserons ces pertes dans le cas d'une monoculture de maïs avec ou sans culture dérobée de ray-grass d'Italie, conduite sur sol granitique, dans les conditions climatiques de type océanique du Finistère. La rotation maïs ray-grass d'Italie s'est largement développée en Bretagne lors de la révolution fourragère des années 70.

Matériel et méthode

— Description de l'installation lysimétrique

L'installation lysimétrique de Quimper a été décrite précisément dans une publication antérieure (COPPENET, 1969). Rappelons qu'elle se compose de 8 cases de 2 m² de surface sur 90 cm d'épaisseur. Les cases ont été remplies en 1953 d'un sol d'origine granitique riche en matière organique (7%) ; la quantité totale d'azote du sol est voisine de 10 t par hectare. Les eaux de drainage, recueillies dans des fosses de réception, sont mesurées journallement et prélevées au dixième pour analyse chimique.

— Protocoles expérimentaux

Par souci de clarté, nous ne présenterons dans ce qui suit, que les résultats des cases où les traitements appliqués ont été les plus contrastés :

— apports d'éléments fertilisants conduisant à de bonnes conditions d'alimentation minérale des plantes ;

— absence de fertilisation phospho-potassique ;

— absence de chaulage ayant entraîné une acidification progressive du sol.

Comme pour l'étude du lessivage de l'azote nitrique, on distinguera deux périodes successives, en raison de la différence dans le temps des protocoles expérimentaux appliqués sur les cases concernées :

— Première période (1969-1981)

Quatre cases sont retenues (n° 1, 2, 3 et 5). Elles portent simultanément les mêmes cultures : monoculture de maïs (1969-1972), maïs avec culture dérobée de ray-grass d'Italie (1973-1981). Le mode de conduite des cases (apports en éléments fertilisants et en amendements calcaires) et leurs caractéristiques (dont le pH des sols) sont présentés tableau 1.

Case	Culture	Amendement calcaire			pH		Fumure (kg/ha/an)		
		Nature	Date	(t/ha) en CaO	initial	final	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Période 1969-1972									
1	Maïs	Chaux	1954	7,3	7,0		115	60	150
	Maïs	Chaux	1958	7,3		6,8			
2	Maïs	Chaux	1954	2,4	5,5	5,3	115	60	150
3	Maïs	Maërl	1954	7,3	5,9	5,9	115	60	150
5	Maïs	Chaux	1954	7,3	5,6	5,5	115	0	0
Période 1973-1981									
1	Maïs+RGI	sans			6,8	6,3	240	60-75	325
2	Maïs+RGI	sans			5,3	4,9	240	60-75	325
3	Maïs+RGI	sans			5,9	5,6	240	60-75	325
5	Maïs+RGI	sans			5,5	5,3	240	0	0
Période 1983-1988 *									
1	Maïs+RGI	sans			6,1	5,9	240	75	400
2	Maïs	Chaux	1982	5,0	6,3	5,8	120	75	250
3	Maïs	Chaux	1982	2,5	6,0	5,6	180	75	250
6	Maïs+RGI	Chaux	1982	5,0	6,7	6,0	180	75	400

* En 1982, année de transition après chaulage, les cases ont été conduites comme de 1983 à 1988.

TABLEAU 1 : Mode de conduite des cases lysimétriques et pH de leurs sols de 1969 à 1988

TABLE 1 : Management of lysimeters and soil pH (1969-1988).

Les sols des cases 1, 2 et 3 présentent une bonne fertilité phospho-potassique, excepté de 1969 à 1972 où ils peuvent être considérés comme pauvres en K échangeable (tableau 2). Ils diffèrent essentiellement par leur acidité (tableau 1) : on rappellera à ce sujet que la gamme de pH conseillée dans ce type de sol est située entre 6,0 et 6,5 (COPPENET, 1980). Si le sol de la case 1 rentre dans ces normes, ceux des cases 2 et 3 présentent respectivement une très forte et une très faible acidité.

La case 5, quant à elle, est acide et peut être considérée comme extrêmement pauvre en acide phosphorique assimilable et en potassium échangeable (< 60 mg/kg de terre en P₂O₅ ou K₂O).

— Deuxième période (1983-1988)

Les quatre cases observées (n° 1, 2, 3 et 6) ne portent plus simultanément la même culture. Un chaulage, effectué en 1982 sur trois d'entre elles afin de redresser des pH trop acides, a amené en 1983 les sols à des pH plus favorables. On peut remarquer l'importance des diminutions de pH au cours de la dernière période.

Les sols de ces cases, d'un bon niveau de fertilité phosphatée, passent, du début à la fin de seconde période, de faiblement pourvu (voire pauvre pour la case 6), à bien pourvu ou riche en K échangeable (tableau 2).

Années Culture	1969 Maïs	1973 Maïs + RGI	1981	1983	1986 Maïs et Maïs + RGI	1988
P citrique*						
Case 1	251	227	180	230	204	275
Case 2	315	292	246	370	308	445
Case 3	287	283	234	320	288	285
Case 5	57	37	30			
Case 6			45	200	310	325
K échangeable*						
Case 1	128	87	238	135	288	325
Case 2	125	107	238	190	273	325
Case 3	115	105	238	195	277	290
Case 5	8	53	56			
Case 6			76	80	306	360

* Grille d'interprétation des teneurs du sol en P₂O₅ assimilable et K₂O échangeable, selon COPPENET (1980) :

60 mg/kg : extrêmement pauvre	160 à 200 : faible
70 à 100 : très pauvre	210 à 250 : moyen
110 à 150 : pauvre	260 à 300 : bien pourvu
	310 à 400 : riche

TABLEAU 2 : Evolution de la teneur du sol des cases en acide phosphorique assimilable et en potassium échangeable de 1969 à 1988 (P₂O₅ et K₂O en mg/kg ; RGI : ray-grass d'Italie)

TABLE 2 : Evolution of soil fertility for each lysimeter, for citric soluble P and exchangeable (1969-1988 ; P₂O₅ and K₂O : mg/kg ; RGI : Italian rye-grass)

— Remarques générales sur les deux périodes

Les maïs sont semés entre le 20 et le 25 avril, et sont récoltés dans la deuxième quinzaine de septembre. Le ray-grass d'Italie, semé du 25 septembre au 1^{er} octobre, est fauché deux fois, début mars et vers le 20 avril.

Les engrais minéraux azotés, phosphatés et potassiques sont apportés respectivement sous forme de nitrate d'ammonium (33,5%), de superphosphate (45%) et de chlorure de potassium (60%). L'azote est apporté sur maïs au semis. Sur ray-grass, il est épandu soit au semis et après la première coupe (total annuel : 240 kg/ha), soit uniquement après la première coupe sans apport d'automne (total annuel : 180 kg/ha). Les engrais P sont apportés au printemps avant le maïs. En monoculture de maïs, les engrais K sont épandus au printemps avant labour. Dans le cas de la succession maïs - ray-grass d'Italie, il y a deux apports de K : au printemps avant le maïs et à l'automne avant le ray-grass.

— Prélèvements et analyses

En première période (1969-1981), la cadence des analyses d'eau sur l'échantillon aliquote est trimestrielle. En seconde période (1983-1988), les analyses sont effectuées tous les 15 jours.

Résultats

1. Production annuelle de matière sèche

Les productions globales annuelles de matière sèche sont présentées tableau 3. Au cours de la période 1969-1972, seule la case 5 présente un niveau de production faible, explicable par les effets conjugués de l'acidité de son sol et de sa pauvreté en phosphore assimilable et potassium échangeable (tableau 2).

Période Culture	1969-1972	1973-1981	1983-1988	
	Maïs	Maïs + RGI	Maïs	Maïs + RGI
Case 1	12,6	15,2		15,2
Case 2	11,1	10,6	11,4	
Case 3	12,1	14,1	11,7	
Case 5	6,4	4,3		
Case 6				13,1

TABLEAU 3 : Production moyenne annuelle de matière sèche sur chaque case (t/ha) au cours des différentes périodes (RGI : ray-grass d'Italie)

TABLE 3 : Annual dry matter productions (t/ha) for each lysimeter for various research periods (RGI : Italian rye-grass)

Au cours des années suivantes (1973-1981), la tendance précédemment observée pour cette même case s'accroît : les productions déjà modestes en début de période (7,7 t MS/ha/an) s'effondrent à partir de 1978 (1,3 à 3,1 t MS/ha/an). La production de la case 2 décroche également consécutivement à une acidification excessive de son sol (tableau 1) : élevée en 1973 (18,3 t MS/ha), elle est voisine de 10 t de 1976 à 1979 et chute ensuite rapidement (5,6 t en 1980 et 2,6 t en 1981).

Les cinq dernières années d'observation, les niveaux de production redeviennent normaux pour des cases lysimétriques, aussi bien pour la monoculture de maïs que pour le maïs suivi d'un ray-grass d'Italie dérobé, du fait d'un chaulage et d'une fertilisation P-K de redressement des cases déficientes.

2. Pertes et drainage

Les quantités d'eau drainées par les cases reflètent le caractère océanique accusé du climat local. En moyenne, pour des précipitations annuelles de 1 040 mm, les quantités d'eau drainées sous culture sont de 570 mm, ce qui est très important comparativement aux autres sites lysimétriques français. Les variations interannuelles des quantités drainées sont cependant très importantes : 170 mm en 1975 et 800 mm en 1987. Elles reflètent principalement les fluctuations interannuelles des précipitations. Les coefficients de drainage sont voisins de 55 %.

Les trois périodes de mesures sont climatiquement contrastées. De la première à la troisième, les précipitations annuelles sont respectivement inférieures aux normales (969 mm), normales (1 042 mm) et élevées (1 090 mm). Il en résulte des quantités d'eau drainées diversifiées : 460 mm/an en moyenne de 1969 à 1972, 580 mm de 1973 à 1981 et 690 mm de 1983 à 1988.

Le drainage commence en octobre-novembre, dès que les précipitations automnales dépassent 100 à 120 mm. Il est généralement maximum de décembre à février, avec des quantités moyennes mensuelles supérieures à 100 mm (SIMON et LE CORRE, 1988). Le drainage ralentit ensuite, avec parfois des reprises en fin d'hiver et au printemps. Il est nul pendant les mois d'été.

Le volume drainé en fin d'automne - début d'hiver est important relativement à la réserve utile du sol (estimée à 120 mm). En effet, en ces 2 ou 3 mois de fort drainage, environ 3 fois la réserve utile du sol est drainée. Cela peut permettre de prévoir l'entraînement hors de la case, dans ce court intervalle de temps, de la presque totalité des reliquats des éléments solubles ($N(NO_3^-)$, Cl^- , $S(SO_4^{2-})$, ...) présente dans toute l'épaisseur du sol à l'automne, et des cations associés les plus mobiles.

Les relations entre pertes annuelles d'éléments minéraux et drainage sont peu étroites, même si elles sont significatives sur certaines périodes. Ceci peut s'expliquer par l'importance des quantités annuelles drainées comme nous l'avons évoqué ci-dessus.

3. Equilibre anions - cations

En vertu du principe de l'équilibre ionique des solutions aqueuses, la perte d'un anion par drainage entraîne dans le même temps celle d'un cation de même valence. Ainsi, à Quimper, on peut remarquer la relation linéaire, hautement significative, entre la somme des principaux anions lessivés (NO_3^- , SO_4^{2-} , Cl^-) et la somme des cations (K^+ , Na^+ , Mg^{++} , Ca^{++}) des eaux de drainage annuelles des différentes cases, pour la période 1969-1988 (figure 1). Les anions HCO_3^- et

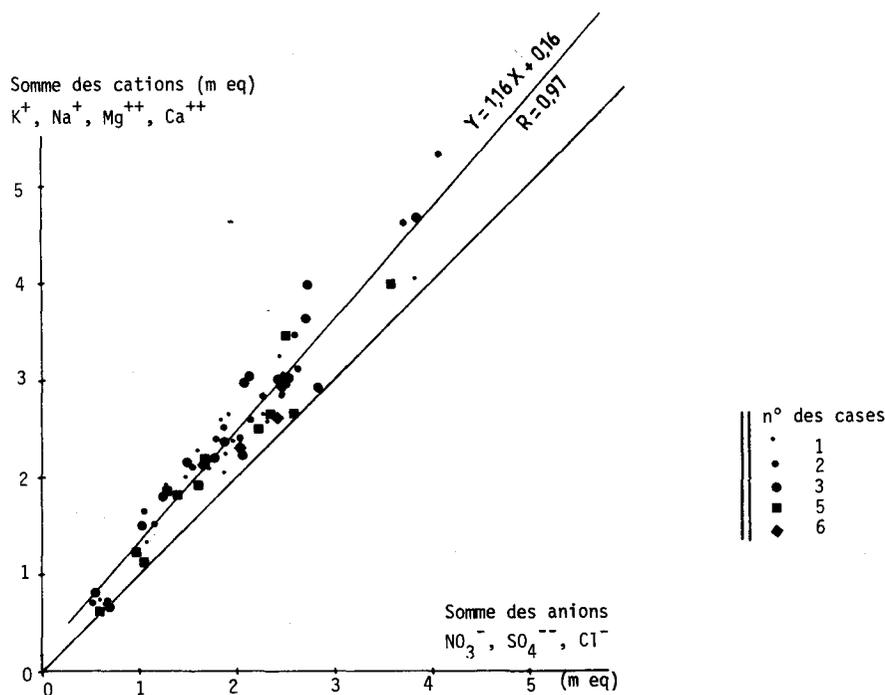


FIGURE 1 : Relation entre la somme des anions et des cations drainés à Quimper (1969-1988)
 FIGURE 1 : Relationship between anion and cation amounts in water leached in Quimper (1969-1988)

Si O_4^{--} n'ont pas été pris en compte dans cette relation, car non dosés, ce qui est vraisemblablement à l'origine du décalage observé entre la droite de régression calculée et la première bissectrice (TRIBOÏ, 1981); l'ensemble des anions déterminés dans notre étude rend ainsi compte de 80,6% en moyenne des cations lessivés, de 70 à 83% selon l'importance de la somme des anions qui est apparue varier dans de larges proportions : 1 à 8 (c'est-à-dire de 0,5 à 4 méq/l). Nous présenterons, dans ce qui suit, les pertes de chacun des anions analysés, sauf les nitrates (SIMON et LE CORRE, 1988), puis celles relatives aux divers cations (car dépendantes en grande partie des premières), et les relations qui les unissent.

4. Pertes en anions

— *Pertes en chlore*

Les pertes en chlore par lessivage augmentent avec le niveau des apports de chlorure (tableau 4). Il existe une relation linéaire significative entre les intrants sous forme de chlorure de potassium et le lessivage annuel moyen en cet élément.

Période	1969-1972	1973-1981	1983-1988
Case 1	151,2	304,1	391,2
Case 2	161,9	325,4	338,2
Case 3	157,3	315,0	329,5
Case 5	86,8	115,7	
Case 6			426,9

TABLEAU 4 : Valeurs moyennes annuelles des pertes en chlore par lessivage (kg/ha)

TABLE 4 : Means of annual values of Cl leaching (kg/ha)

Les résultats de la case 5 nous permettent de situer l'importance des apports de chlore (sous forme NaCl) par les pluies et embruns dans la situation maritime de Quimper. Compte-tenu des exportations moyennes de chlore par les cultures (40 à 60 kg/ha/an), ces apports pourraient être supérieurs à 100 kg/ha/an. Cet ordre de grandeur est en accord avec l'estimation que l'on peut en faire à partir des concentrations en chlore des eaux de pluie (10 à 15 mg de Cl/l, d'après quelques mesures effectuées à Quimper) et des précipitations annuelles (1 040 mm).

La cinétique du lessivage annuel du chlore est présentée figure 2a, pour la case 1 (hiver 1986-87). Dans cet exemple, le pic de concentration est très accusé au moment du premier pic hivernal de drainage (200 mg/l), puis les concentrations chutent très rapidement en 1,5 à 2 mois. Du fait de la solubilité des chlorures, de la non rétention de l'anion Cl⁻ par le sol, et de l'importance du drainage annuel par rapport à la réserve utile du sol, les chlorures présents dans le sol à l'automne sont lessivés en totalité dans les deux premiers mois de drainage en fin d'automne - début d'hiver.

Pour chacune des cases présentées, le bilan annuel du chlore est sensiblement nul.

— *Pertes en soufre*

Les pertes en soufre sont précisées dans le tableau 5. Les valeurs moyennes par période sont très variables : de 21 à 96 kg de S/ha/an.

La cinétique de lessivage du soufre ne semble pas suivre les mêmes règles que celle du chlore (figure 2b), ce qui est à mettre en relation avec l'apport ponctuel

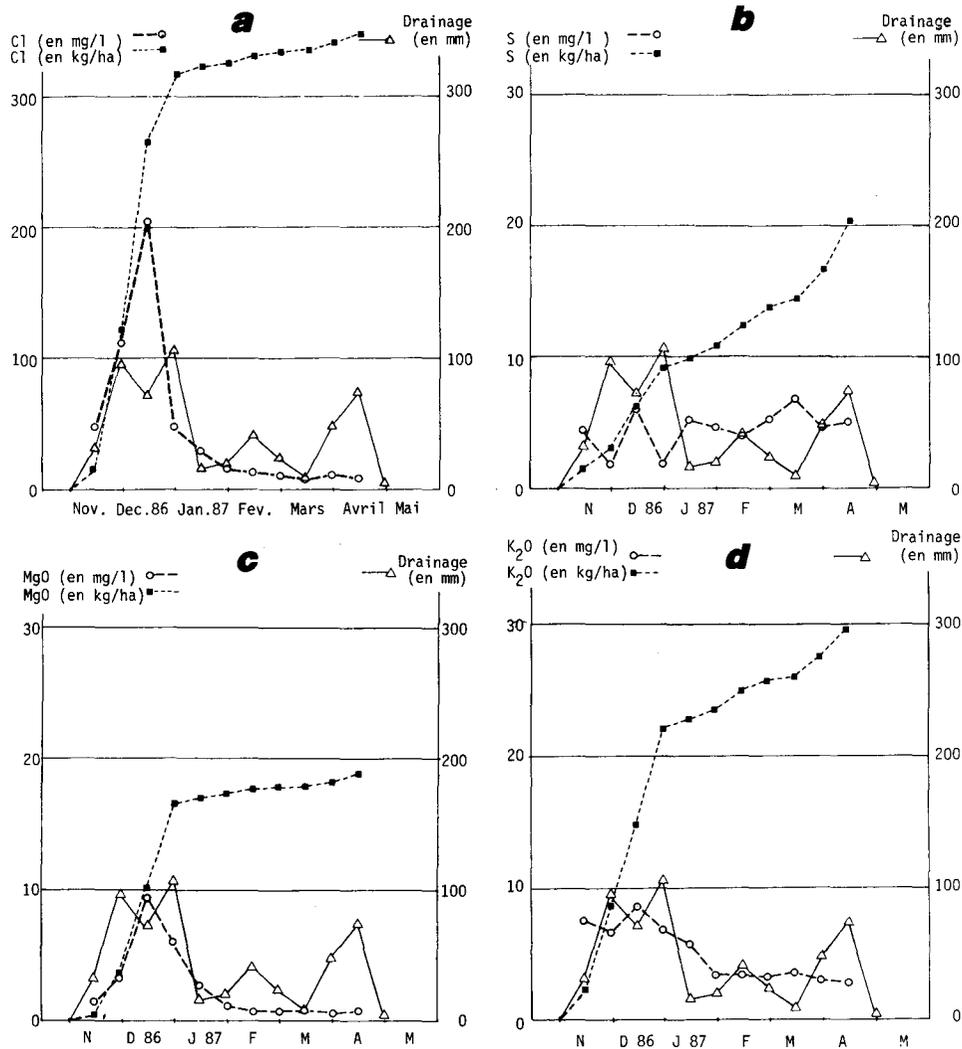


FIGURE 2 : Cinétiques de lessivage du chlore (a), du soufre (b), du magnésium (c) et du potassium (d) : quantités bimensuelles d'eau drainée (en mm), concentrations en éléments des eaux drainées (en mg/l), lessivage cumulé (en kg/ha)

FIGURE 2 : Kinetics of chlorine (a), sulphur (b), magnesium (c) and potassium (d) leachings : fortnightly volumes of water drained (mm), concentrations of leachates (mg/l), cumulated losses in water drained (kg/ha)

Période	1969-1972	1973-1981	1983-1988
Case 1	43,9	69,4	38,0
Case 2	37,4	67,5	87,4
Case 3	40,7	74,4	76,4
Case 5	21,0	31,3	
Case 6			96,3

TABLEAU 5 : Valeurs moyennes annuelles des pertes en soufre par lessivage (S en kg/ha)

TABLE 5 : Means of annual values of S leaching (kg/ha).

et important (une ou deux fois par an) de Cl^- sous forme de chlorure. La courbe des concentrations est irrégulière, les fortes concentrations correspondant aux faibles drainages et inversement, d'où un lessivage régulier du soufre tout au long de l'hiver (courbe des valeurs cumulées). Tout se passe comme s'il y avait un approvisionnement constant du pool de soufre minéral du sol, la concentration des eaux lessivées étant inversement proportionnelle aux quantités d'eau drainées (phénomène de dilution). La constance de cet approvisionnement est explicable par les deux sources essentielles et continues de sulfates : d'une part, les apports atmosphériques (sans doute faibles à Quimper), d'autre part, la minéralisation du soufre de la matière organique de l'horizon de surface du sol ; cette dernière, variable selon les conditions physico-chimiques du sol, pourrait se produire d'une manière continue sous les conditions climatiques locales.

— Pertes en phosphore

Les pertes en phosphore sont très faibles et généralement comprises entre 100 et 150 g de $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha}/\text{an}$. Aussi, les mentionnons-nous ici uniquement pour mémoire. Ce très faible lessivage est nettement inférieur à celui donné en 1969 par COPPENET, qui indiquait des pertes moyennes de 550 à 650 g de $\text{P}_2\text{O}_5/\text{ha}/\text{an}$. C'est l'utilisation, à partir de 1966, d'une méthode de dosage des phosphates par céruléomolybdimétrie, tenant compte de l'interférence des silicates (DUVAL, 1966 ; BOUTIN, 1969), qui est à l'origine de la différence observée, l'interférence $\text{SiO}_4^{3-}/\text{PO}_4^{3-}$ amenant à une surestimation de la concentration en PO_4^{3-} de la solution.

La faiblesse des pertes en phosphate, malgré l'entretien d'une teneur assez élevée en P assimilable des sols par des apports annuels moyens de superphosphate, s'explique par une forte rétention des phosphates dans la couche superficielle et le proche sous-sol des sols de ces cases.

Dans les exploitations pratiquant un système d'élevage intensif, où les apports massifs de lisiers et les exportations modérées de P par les récoltes conduisent à des bilans du phosphore nettement positifs et à un enrichissement du sol en phosphore assimilable (COPPENET, 1974 ; COPPENET et GOLVEN, 1984 ; COPPENET, 1985), il est vraisemblable que les pertes en phosphore par lessivage soient aussi également très faibles.

5. Pertes en cations

— Pertes en calcium

Les pertes en calcium par lessivage sont présentées dans le tableau 6. On observe une nette augmentation du lessivage de calcium, qui constitue à lui seul 80% en moyenne de la somme des cations lessivés, entre 1969-1972 et 1973-1981, puisqu'il passe de 300 à 600 kg/ha/an de CaO.

Période	1969-1972	1973-1981	1983-1988
Case 1	323	531	584
Case 2	377	694	582
Case 3	311	601	698
Case 5	309	622	
Case 6			545

TABLEAU 6 : Valeurs moyennes annuelles des pertes en calcium par lessivage (exprimées en kg/ha de CaO)

TABLE 6 : Means of annual values of Ca leaching (expressed as CaO, kg/ha).

Cette évolution est à mettre en relation avec une augmentation des niveaux de fertilisation azotée et potassique et une modification du système de culture (tableau 1). La modification des conditions expérimentales se traduit par une augmentation du lessivage des principaux anions qui jouent le rôle d'entraîneur : azote $N(NO_3^-)$ (SIMON et LE CORRE, 1988), Cl^- et $S(SO_4^{2-})$ (voir plus haut). Ainsi, pour la case 1, les pertes moyennes d'azote nitrique par lessivage passent de 60-70 kg/ha/an au cours de la première période à 90-100 pour la seconde, de 151 à 304 kg/ha/an pour Cl^- , et de 44 à 69 pour le $S(SO_4^{2-})$. Il s'ensuit une augmentation du lessivage des principaux cations dont le plus important : le calcium.

Une analyse des quantités globales annuelles lessivées montre qu'il existe une relation linéaire hautement significative entre azote nitrique et calcium d'une part et chlore et calcium d'autre part (figures 3a et 3b).

Si les exportations de calcium par les cultures varient dans de faibles proportions (35 à 70 kg de CaO/ha), les quantités lessivées peuvent varier dans des proportions considérables : 120 à 680 kg/ha/an de Ca pour la case 1 (1973-1981) ; cette dernière valeur est néanmoins exceptionnelle ; elle correspond à l'année 1976, où les pertes d'azote nitrique et de chlore ont été respectivement de 238 et 472 kg/ha/an.

Le parallélisme entre lessivage d'azote ou de chlore et lessivage de calcium peut être observé à une échelle plus fine, en comparant les cinétiques des pertes hivernales des trois éléments (figures 2a, 4a et 4b), dans le cas de la case 1. On remarque sur ces figures :

— l'évolution parallèle des cinétiques de lessivage des 3 éléments ;

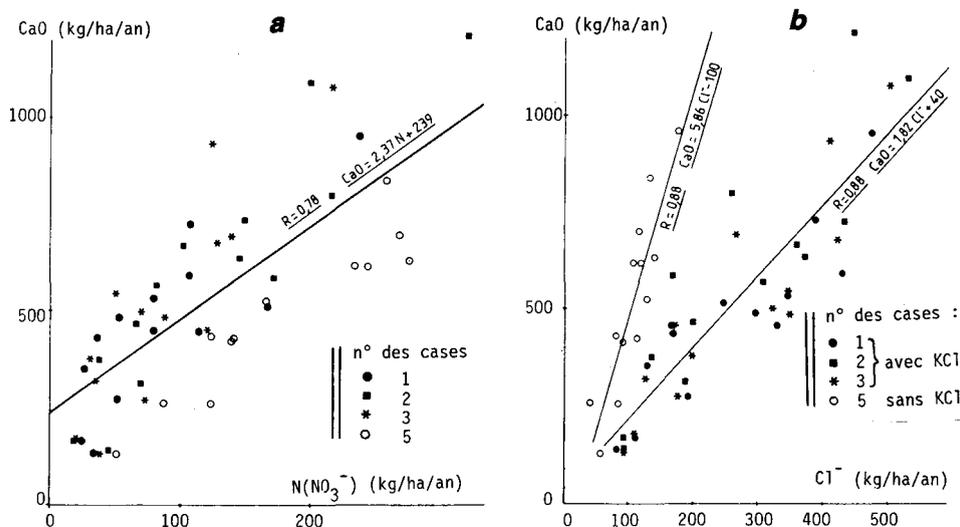


FIGURE 3 : Relation entre les quantités lessivées d'azote nitrique (a) ou de chlore (b), et celles de calcium (1969-1981)

FIGURE 3 : Relationship between nitrogen (a), chlorine (b) and calcium leachings (1969-1981)

— la présence d'un pic de concentration accusé, en décembre, au moment du premier pic de drainage ;

— le passage dans les eaux de lessivage de la plus grande partie des pertes de l'élément considéré lors de ce pic (-75 % du $N(NO_3^-)$, 90 % du chlore et 80 % du calcium) ;

— la poursuite d'un lessivage faible mais soutenu des trois éléments à la fin de la période hivernale et en période printanière.

— *Pertes en magnésium*

Les pertes moyennes en magnésium par lessivage sont présentées dans le tableau 7. Les pertes sont généralement comprises entre 10 et 20 kg de MgO/ha/an et constituent 3,6% seulement en moyenne des pertes globales en cations. Elles sont plus élevées sous la case 3 chaulée avec du maërl, ce dernier contenant 3% de MgO : 17 à 28 de kg de MgO/ha/an. Les exportations par les cultures sont du même ordre de grandeur : 7 à 20 kg de MgO/ha.

On observe pour le magnésium les mêmes phénomènes que pour le calcium. La quantité de magnésium lessivée augmente avec les quantités d'azote et de chlore percolées (figures 5a et 5b).

La cinétique du lessivage du magnésium est tout à fait comparable à celles de l'azote, du chlore et du calcium (figure 2 c).

— *Pertes en potassium*

Les pertes moyennes annuelles en potassium sont présentées dans le tableau 8. Elles sont voisines d'une trentaine de kg/ha/an sur la période étudiée, chiffre voisin de celui observé antérieurement par COPPENET (1969) sur les mêmes cases. La participation du potassium aux pertes en cations en sols fertilisés en K, se situe en moyenne à 3,6%.

Le lessivage annuel du potassium apparaît présenter des variations selon le niveau de fertilisation potassique de la case et le système de culture en place :

— En sol très appauvri en potasse, consécutivement à l'absence continue d'apport de K (case 5), où la teneur en potassium échangeable est descendue à 53 mg de K₂O/kg de terre en 1981, les pertes sont les plus faibles : 11,9 kg/ha/an.

— En monoculture de maïs, un enrichissement de teneur du sol qui passe de 100-125 mg/kg de terre (1969-1972) à 200-300 (1983-1988) suite à des apports annuels plus importants d'engrais potassiques, se traduit par une augmentation sensible des pertes par lessivage : 70 kg/ha/an au lieu de 30, pour un pH du sol sensiblement constant (voisin de 5,9), et cela, même compte-tenu de l'augmentation des drainages entre les périodes concernées.

— Sur la troisième période, on remarque que les pertes sont plus faibles sous la succession maïs - ray-grass d'Italie fauché (cases 1 et 6) que sous monoculture de maïs (cases 2 et 3), même si le niveau des apports est plus élevé (400 kg de K₂O/ha/an au lieu de 250). Ceci s'explique par une immobilisation de potassium par le ray-grass supérieure à 150 kg de K₂O/ha. Indiquons que le maïs exporte en moyenne 200 kg de K₂O/ha.

— Si le niveau de production chute, suite à une acidification du sol, les pertes de potasse peuvent devenir très élevées. C'est ce que l'on observe case 2 (figure 6).

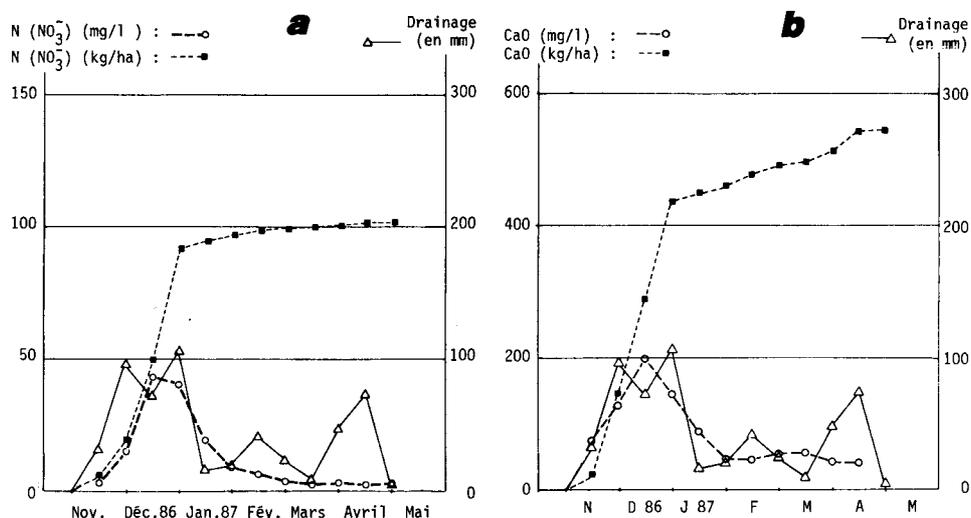


FIGURE 4 : Cinétiques du lessivage de l'azote nitrique (a) et du calcium (b) : quantités bimensuelles d'eau drainée (en mm), concentrations en éléments des eaux drainées (en mg/l), lessivage cumulé (kg/ha)

FIGURE 4 : Kinetics of nitrogen (a) and calcium (b) leachings : fortnightly volumes of water drained (mm), concentrations of leachates (mg/l), cumulated losses in water drained (kg/ha).

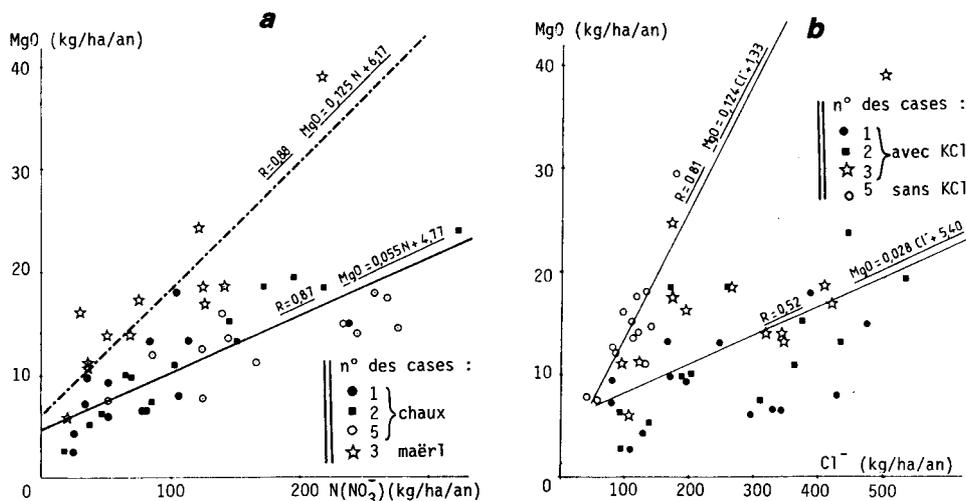


FIGURE 5 : Relation entre les quantités lessivées d'azote nitrique (a) ou de chlore (b), et celles de magnésium (1969-1981)

FIGURE 5 : Relationship between nitrogen (a), chlorine (b) and magnesium leachings (1969-1981)

Période	1969-1972	1973-1981	1983-1988
Case 1	9,9	8,9	15,9
Case 2	11,2	12,9	23,3
Case 3	17,3	17,0	27,7
Case 5	12,3	15,6	
Case 6			19,5

TABLEAU 7 : Valeurs moyennes annuelles des pertes en magnésium par lessivage (exprimées en MgO, kg/ha)

TABLE 7 : Means of annual values of Mg leaching (expressed as MgO, kg/ha)

Période	1969-1972	1973-1981	1983-1988
Case 1	26,8	19,3	33,3
Case 2	35,9	48,7	112,3
Case 3	33,9	24,2	69,2
Case 5	16,8	11,9	
Case 6			40,2

TABLEAU 8 : Valeurs moyennes annuelles des pertes en potassium par lessivage (exprimées en K₂O, kg/ha)

TABLE 8 : Means of annual values of potassium leaching (expressed as K₂O, kg/ha)

Sur cette case où la teneur en potassium échangeable est en progression constante suite aux apports soutenus de K, la production de la succession maïs - ray-grass d'Italie chute brutalement en 1980, quand le pH du sol devient inférieur à 5. Le lessivage de potassium dépasse alors 200 kg de K₂O/ha/an, de 1981 à 1983. Le retour à des niveaux de production satisfaisants, suite au chaulage de 1982, entraîne une diminution du lessivage qui avoisine 60 kg/ha/an dès 1986, soit un chiffre comparable à celui de la case 3.

— Il existe une relation entre les pertes de potassium et celles d'azote (figure 7a). Cette relation est moins étroite que celle observée avec les deux éléments précédents, mais elle est néanmoins très hautement significative dans les sols bien pourvus en K échangeable. On n'observe pas de telle relation en sol très pauvre en K échangeable (case 5), où il n'y a pas eu d'apport d'engrais potassiques depuis la mise en place des cases en 1953. La corrélation entre les pertes de potassium et celles de chlore n'est pas significative (figure 7b).

La cinétique de lessivage du potassium est sensiblement différente de celle des autres éléments présentés ci-dessus (figure 2 d) : la courbe de concentration en potassium des eaux drainées ne présente pas un pic aussi net que pour l'azote nitrique,

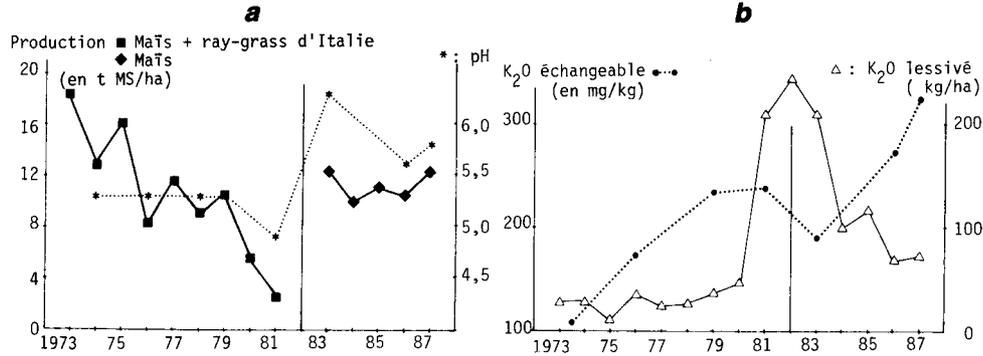


FIGURE 6 : Lessivage du potassium dans une case lysimétrique passant par une phase d'acidification forte : a) évolution de la production de matière sèche et du pH, b) variations de teneurs en potasse échangeable du sol et des quantités lessivées

FIGURE 6 : Potassium leaching in a temporarily acid lysimeter : a) dry matter production and pH evolution, b) variations in soil content and annual leachings of potassium (expressed as K₂O)

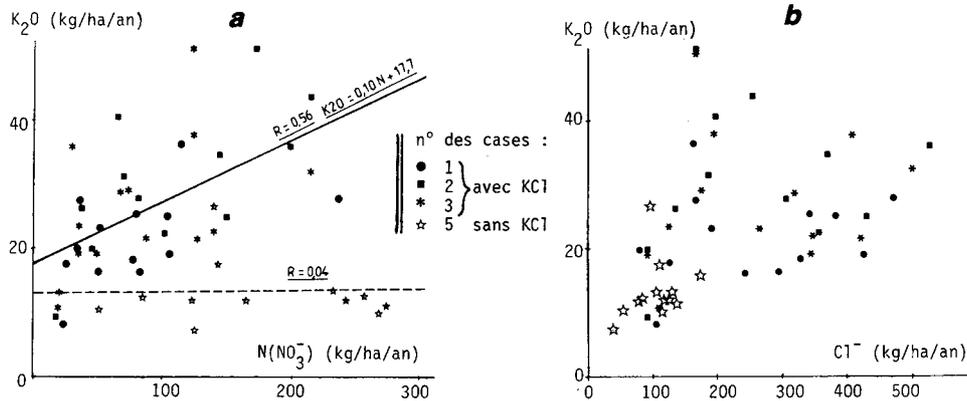


FIGURE 7 : Relation entre les quantités lessivées d'azote nitrique (a) ou de chlore (b), et celles de potassium (1969-1981)

FIGURE 7 : Relationship between nitrogen (a), chlorine (b) and potassium leachings (1969-1981)

le chlore, le calcium et le magnésium, mais plutôt une diminution régulière tout au long de la période de drainage, les concentrations les plus élevées ayant lieu dès la reprise du drainage.

L'augmentation du lessivage de potassium avec l'enrichissement de la teneur du sol pourrait expliquer que les teneurs de potassium échangeable plafonnent vers

une valeur limite de 400 mg/kg de terre dans les sols granitiques voisins à ceux des cases, dans les exploitations agricoles épandant de fortes doses de lisier (COPPENET et GOLVEN, 1984 ; SIMON et GOLVEN, 1987). Cette valeur limite pourrait résulter d'une saturation apparente des sites de fixation du potassium et du lessivage du K non utilisé par les cultures. Il convient donc d'être prudent sur l'interprétation de nos résultats et sur l'extrapolation de nos observations obtenues avec un engrais KCl. La date d'apport du lisier, son volume épandu, sa teneur en K doivent fortement influencer les pertes de potassium.

— *Pertes de sodium*

Les pertes de sodium présentées dans le tableau 9 montrent une amplitude de variation comprise entre 65 et 110 kg de Na₂O/ha/an ; elles correspondent en moyenne à environ 13% de la somme des cations lessivés annuellement.

Période	1969-1972	1973-1981	1983-1988
Case 1	68,9	101,6	98,5
Case 2	72,4	107,6	94,9
Case 3	76,0	108,6	106,9
Case 5	65,8	86,9	
Case 6			108,4

TABLEAU 9 : Valeurs moyennes annuelles des pertes en sodium par lessivage (exprimées en kg/ha de Na₂O)

TABLE 9 : Means of annual values of Na leaching (expressed as Na₂O, kg/ha)

La cinétique hivernale du lessivage du sodium est très voisine de celles du magnésium et du calcium : présence d'un pic de concentration accusé au moment du premier pic de drainage (10-20 mg/l de Na₂O, parfois plus), quantité de sodium lessivée au moment de ce pic égale à 90% de la quantité globale lessivée au cours de l'hiver.

Discussion

Les résultats de Quimper sont comparés à ceux obtenus avec d'autres dispositifs lysimétriques, dont les principales caractéristiques et le mode de conduite sont présentés dans le tableau 10. Le site de Versailles (Bassin Parisien) correspond à un climat semi-continentale, celui de Theix (Massif Central), au climat de moyenne montagne. Les quantités d'eau drainée sont très diversifiées entre dispositifs.

Comme nous l'avons montré plus haut (figure 1), les pertes en cations ne peuvent être dissociées des pertes en différents anions, ces derniers jouant le rôle d'élé-

ments moteurs. Le tableau 11 présente pour les 3 sites, les pertes moyennes annuelles par lessivage exprimées en charges ioniques pour chacun des principaux éléments : $N(NO_3^-)$, Cl^- , et $S(SO_4^{--})$ pour les anions et Ca^{++} , Mg^{++} , K^+ et Na^+ pour les cations.

Le mode de conduite des cases est très différent d'un site à l'autre. Néanmoins, ce tableau met en évidence qu'une perte plus importante d'anions se traduit dans

Site	Type de sol et profondeur	P* (mm)	D* (mm)	Coefficient de drainage (%)	Type de culture**	Fertilisation
Quimper	Granitique (90 cm)	1040	570	50	CA	(tableau 1)
Versailles	Limon (100 cm)	600	150	25	CA	nitrate de K sulfate de K
Theix	Granitique (80 cm)	790	400	55	CA PT PP	ammonitrate sulfate de K

* P : précipitations ; D : drainage ;
** CA : cultures annuelles ; PT : prairies temporaires et PP : prairies permanentes.

TABLEAU 10 : Caractéristiques principales et mode de conduite des dispositifs lysimétriques comparés à Quimper

TABLE 10 : Main characteristics and management of lysimeters compared in Quimper

Site		Principaux anions			Principaux cations				
		$N(NO_3^-)$	Cl^-	$S(SO_4^{--})$	Ca^{++}	Mg^{++}	K^+	Na^+	
Quimper	1969-1972	Chaux	4,18	4,26	2,74	11,52	0,50	0,57	2,22
		Maërl	4,88	4,23	3,04	11,80	1,15	0,51	2,57
	1973-1981	Chaux	6,27	8,57	4,34	18,96	0,45	0,41	3,27
		Maërl	6,76	8,52	4,60	19,29	1,05	0,40	3,43
Versailles	1973-1977	SO_4^{--}	2,79	4,01	6,68	14,00	1,00	1,00	0,26
	1983-1987	sans	1,40	3,61	1,95	9,3	0,58	0,81	0,23
Theix	1970-1979	C.A.*	3,36	2,23	2,68	5,39	2,96	0,61	0,64
		P.T.	0,29	2,54	2,61	4,57	2,35	0,45	0,56
		P.P.	0,50	2,37	2,97	4,46	2,35	0,23	0,54

* CA : Cultures annuelles ; PT : Prairies temporaires ; PP : Prairies permanentes.

TABLEAU 11 : Pertes en anions et cations dans les eaux de drainage de trois sites, exprimées en charges ioniques (k.éq.) : Quimper (Bretagne), Versailles (Bassin Parisien) et Theix (Massif Central)

TABLE 11 : Anion and cation leaching (k.eq.), for the 3 sites : Quimper (SW. of Brittany), Versailles (the Paris Basin) and Theix (the Central Massif)

tous les cas par une augmentation des pertes en différents cations et en particulier du plus important : le calcium. Par exemple, pour Versailles, la suppression des apports de sulfates à partir de 1983, conduit à une forte diminution des pertes en $S(SO_4^-)$ (6,68 à 1,95 kéq/ha/an), les pertes en cations suivant cette même tendance : forte baisse du lessivage de calcium (14,0 à 9,3 kéq/ha/an), baisse également du magnésium (1,00 à 0,58 kéq/ha/an) et du potassium (1,00 à 0,81 kéq/ha/an). A Theix, les lessivages élevés de nitrates sous les cultures annuelles conduisent à des effets similaires.

Afin de fixer des ordres de grandeur des quantités d'éléments minéraux lessivées, nous avons rassemblé dans le tableau 12 les amplitudes de variation des pertes observées à Quimper, Theix et Versailles. Ce tableau met en évidence, pour un élément donné, une grande variabilité de la quantité perdue par lessivage selon les conditions pédo-climatiques (variations entre sites), le type de culture et le mode de conduite (variations sur un même site).

Eléments	Quimper	Theix (TRIBOI, 1981)	Versailles (BASTISSE, 1953) (BONIFACE, Comm. Pers.)
P ₂ O ₅	0,10 - 0,15		0,15 - 0,20
K ₂ O	30 - 60	20 - 35	5 - 20
CaO	300 - 600	120 - 200	150 - 600
MgO	10 - 20	50 - 60	5 - 30
Na ₂ O	70 - 100	20 - 30	10 - 50
Cl	140 - 350	80 - 100	60 - 200
S	35 - 75	20 - 50	10 - 130

TABLEAU 12 : Comparaison des lessivages en éléments minéraux entre Quimper, Theix et Versailles (en kg/ha/an)

TABLE 12 : Comparison of leachings (kg/ha/year) between Quimper, Theix, and Versailles

Conclusion

Dans le contexte de l'agriculture intensive bretonne, ces résultats prennent toute leur importance. En effet, les épandages massifs de déjections animales, essentiellement sous forme de lisiers, apportent des quantités d'éléments fertilisants généralement supérieures aux besoins des cultures, même pour des niveaux de production élevés (COPPENET, 1974 et 1985), auxquels il faut ajouter les apports minéraux. Rappelons que 50 m³ de lisier de porc non dilué apportent en moyenne 225 kg de N, 200 kg de P₂O₅, 150 kg de K₂O, 125 kg de CaO, 50 kg de MgO, 40 kg de Na. Il importe donc de connaître le devenir dans le milieu des éléments en excès. Les présents résultats permettent d'apporter déjà quelques éléments de réponse :

— Le *phosphore*, très énergiquement retenu par le complexe argilo-humique ne lessive pratiquement pas (150 g de P_2O_5 /ha/an). Les sols recevant de fortes doses de lisiers doivent donc s'enrichir en phosphore, sans alimenter les nappes aquifères ; les enquêtes réalisées en exploitation agricole confirment cette tendance (COPPENET et GOLVEN, 1984 ; SIMON et GOLVEN, 1987). La pollution des rivières par le phosphore ne peut donc s'expliquer que par une autre source de pollution (lessives ou autre) et/ou par l'érosion des sols et le ruissellement superficiel du lisier.

— Le *calcium* lessive généralement en quantité d'autant plus importante que le lessivage des anions (nitrate, chlore, sulfate) est élevé. Si l'azote apporté par les lisiers n'est pas valorisé par les cultures (dose trop importante, épandage en période hivernale sur sol nu, SIMON et LE CORRE, 1988), et/ou si les apports de chlorure et de sulfate sont élevés, on peut s'attendre à une augmentation du lessivage de tous les cations, dont le calcium.

— Le *potassium* lessive en quantité faible (30 kg/ha/an) pour une fertilisation potassique moyenne et un niveau de production végétale satisfaisant. Une augmentation des apports de potassium se traduit par un enrichissement du sol (en K échangeable et non échangeable) et de la plante (consommation de luxe), mais aussi par une augmentation du lessivage. Cette observation pourrait partiellement expliquer les évolutions observées des teneurs du sol en potassium échangeable, dans le cas de forts apports de lisiers : enrichissement jusqu'à une limite moyenne d'environ 400 mg de K_2O /kg de terre, dans le sol granitique étudié à faible capacité d'échange (COPPENET et GOLVEN, 1984).

Accepté pour publication, le 22 mai 1989.

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier particulièrement M. COPPENET et Mme R. BONIFACE pour leur aide et leurs conseils pour la réalisation de cet article.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BASTISSE E-M. (1953) : "Dix-huit années d'études lysimétriques appliquées à l'agronomie", *Ann. Agron.*, 19, 53-76.
- BOULIN R. (1969) : "Etude des hétéropolyacides", *Chim. Anal.*, 51, 369-375.
- COPPENET M. (1969) : "Résultats de 12 années d'observations lysimétriques à Quimper (1954-1965)", *Ann. Agron.*, 20 (2), 111-143.
- COPPENET M. (1974) : "L'épandage du lisier de porcherie. Ses conséquences agronomiques", *Ann. Agron.*, 25 (2-3), 403-423.
- COPPENET M. (1980) : "L'interprétation des analyses des sols de la Bretagne Occidentale en 1980" *Le Trait d'Union Agricole*, n° 76 (juin 80), 10-17.
- COPPENET M., GOLVEN J. (1984) : *Etude lisier-sol-plante : Bilan de 9 années de suivi dans une soixantaine d'exploitations intensives du Finistère*, Publication de la C.A. du Finistère, 33p.
- COPPENET M. (1985) : "Bilan des éléments fertilisants dans les exploitations d'élevage : application à une fertilisation raisonnée", *Techn. Agric.*, 1315 (12-1985), 12p.
- DUVAL L. (1966) : "Influence du silicium, du germanium et du fer sur le dosage céruléomolybdique de l'acide phosphorique", *Chim. Anal.*, vol. 48, n° 5, 290-299.
- SIMON J.-C., GOLVEN J. (1987) : *Etude lisier-sol-plante : Bilan de 12 années de suivi (1973-1985)*, Journée Régionale de Relance Agronomique, Pontivy (31 mars), 12p.
- SIMON J.-C., LE CORRE L. (1988) : "Lessivage d'azote en monoculture de maïs, sous-sol granitique du Finistère", *Fourrages*, 114, 193-207.
- TRIBOÏ E. (1981) : "Bilans hydriques et minéraux en relation avec le système cultural", *Probleme de agrofitotehnie teoretica si aplicata*, vol. III, n° 3, 229-258.

RÉSUMÉ

Les pertes par lessivage d'éléments minéraux autres que l'azote ont été contrôlées sous monoculture de maïs en cases lysimétriques, dans les conditions pédo-climatiques du Sud-Finistère : sol granitique légèrement acide, riche en matière organique (7%), précipitations élevées (1 040 mm/an), drainage important (supérieur à 500 mm/an). Si les pertes de phosphore sont négligeables (100 à 150 g/ha/an de P₂O₅), celles en magnésium sont modérées (10 à 20 kg/ha/an de MgO). Les pertes en potassium sont assez variables (30 à 60 kg/ha/an de K₂O, exceptionnellement plus dans certaines conditions) et celles en calcium très importantes (350 à 600 kg/ha/an, de CaO). Le niveau du lessivage en calcium et magnésium est étroitement corrélé avec celui des flux de nitrates et celui des intrants comportant des chlorures et/ou des sulfates...

SUMMARY

Leaching of mineral elements (nitrogen excepted) in maize monoculture under granitic soil, in S-W. Brittany

Mineral element leachings through drainage (nitrogen excepted) have been studied in lysimeters, for maize monoculture, in the environmental conditions of South-West Brittany : acid granitic soil, rich in organic matter (7%), high annual rainfall (1 040 mm/year) and considerable drainage

(500 mm/year). If phosphorus leaching is nearly insignificant (100 to 150 g P_2O_5 /ha/year), losses in magnesium are moderate (10 to 20 kg MgO/ha/year). Potassium leaching is rather variable (30 to 60 kg K_2O /ha/year, exceptionally more in determined conditions), and calcium losses are very high (350 to 600 kg CaO/ha/year). The level of calcium and magnesium leachings are closely related to nitrogen, chloride and sulfate losses.