

## Contribution de la lysimétrie à l'étude de la dynamique du soufre

J.-L. BALLIF(\*)

J.-C. MULLER(\*)

### RESUME

Les mesures effectuées dans les dispositifs lysimétriques, pendant une période de temps suffisamment longue, supérieure à 10 ans, permettent d'apporter des informations complémentaires sur la dynamique du soufre dans le sol. En sol de craie, la composition ionique des eaux est suivie sous plusieurs systèmes d'exploitation. En sol nu ou enherbé, sans apport de soufre autre que celui des précipitations, les pertes par drainage diminuent progressivement et tendent à s'équilibrer avec les apports par les pluies (30 kg.ha<sup>-1</sup> de SO<sub>3</sub> à Châlons). Les pertes en soufre par les drainages sont en relation avec les niveaux des intrants. En sols cultivés à Quimper, sur sol granitique riche en matière organique, avec des cultures de graminées, la perte moyenne est de 50 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> de SO<sub>3</sub> (1954-1965). A Versailles en sol limoneux, cultivé avec une rotation blé-maïs, elle est de 75 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> de SO<sub>3</sub> (1973-1988). A Clermont-Ferrand en sol argilo-calcaire de Limagne, pour la période 1959-1966, elle est de 193 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> de SO<sub>3</sub>. A Châlons-sur-Marne en sol de craie, avec une rotation betterave-blé, elle est de 340 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup> de SO<sub>3</sub> (1977-1982). Le bilan entrées-sorties, établi annuellement, fait apparaître que les apports par les pluies sont légèrement inférieurs aux exportations par les cultures et que les apports supérieurs aux exportations se retrouvent en totalité dans le drainage. Les lysimètres permettent de suivre la dynamique de cet élément. En sol de craie, contrairement à ce qui est observé pour l'azote, la minéralisation-organisation apparente, malgré une teneur importante en soufre total (S = 0,69 % et rapport N/S = 2,8) est un phénomène très limité.

**MOTS CLES** : lysimètre - sol nu - sol cultivé - sol enherbé - soufre - azote.

### RESEARCH IN LYSIMETERS ON THE DYNAMIC OF SULFATES

*A decrease in the amount of sulfur poses the problem of sulfate fertilization. In France, various studies on lysimeters (Table I) supply information on the dynamic of sulfates. Since 1973 in Châlons, on the drainage waters of lysimeters in non-disturbed chalky soil, the sulfur and nitrogen have been titrated. On these waters, the chemical balance has been computed with the GEOCHEM programm. These studies have made it possible to measure the losses in sulfur (Table II) which are connected with the levels of inputs. In bare and grassed soils, rain providing the only input, the amount of sulfates in drainage tends to decrease and to balance out with the amount of rain (30 kg.ha<sup>-1</sup>.yr<sup>-1</sup> of SO<sub>3</sub>, in Châlons). The leaching losses are analysed in function of drainage volume. The total output by drainage are depicted in function of total volumes of water (Fig. 1, 2, 3). This relation is linear when the sulfate concentration doesn't vary in time. In this case, the system attains a stationary rate. This mode of analysis makes it*

possible to define a fixed rate in Versailles, in cultivated soil, from 1983 to 1988, the average loss is  $0.023 \text{ g.mm}^{-1}.\text{yr}^{-1} \text{ SO}_3$ . In bare soil, since 1972, with atmospheric inputs only, the average loss is  $0,010 \text{ g.mm}^{-1}.\text{yr}^{-1}$  of  $\text{SO}_3$ . In Châlons, in bare soil, without inputs by fertilizers, since 1982, the average loss has been  $0.0025 \text{ g.mm}^{-1}.\text{yr}^{-1}$  of  $\text{SO}_3$ . In the drainage water, sulfates are essentially present as free ions  $\text{SO}_4$  : 75 to 90 % of sulfates (Table III). With a fixed rate, it is possible to make up a sulfate balance without estimating the change in the reserve of the soil. In Châlons, the balance have two important parts : the inputs by the fertilizers (magnesium inputs being brought by sulfate fertilizers), the leaching losses (table IV). The kinetic analyses of the sulfur and nitrogen leaching (Fig. 2, 3) have made it possible to compare the mineralization — apparent organization of these elements in the chalky soil. The available quantities of sulfur and the requirements in fertilizer are compared (Fig. 4). Except for the lysimeters, without sulfur for twelve years, the available quantities of sulfur are plainly superior to the needs of the crops.

**KEY WORDS** : lysimeter - bare soil - cropped soil - grassed soil - sulfur - nitrogen.

## INTRODUCTION :

### SITUATION DE LA FERTILISATION EN SOUFRE

Actuellement, dans certaines situations, le pouvoir alimentaire du sol en soufre peut être insuffisant au moment des besoins intenses des plantes cultivées. Ces situations peuvent résulter de la diminution des apports en soufre provenant des engrais ou de l'atmosphère. En effet, en France, les apports par les engrais estimés à 560 milliers de tonnes de  $\text{SO}_3$ , en 1972, tombaient à 440 milliers de tonnes en 1985 (THIOLLET, 1987). La diminution des apports (120 milliers de tonnes) provient essentiellement de la substitution progressive des engrais phosphatés simples (25 % de  $\text{SO}_3$ ) par le superphosphate « triple » plus riche en  $\text{P}_2\text{O}_5$ , mais ne contenant pratiquement plus de soufre. Le soufre peut être également apporté par les pluies, par l'atmosphère et par d'autres produits. Les apports par les pluies sont plus ou moins importants selon les situations géographiques. Ils vont de  $2,5 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$  à plus de  $340 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$ . Les valeurs les plus faibles sont trouvées en zone rurale et les plus élevées en zone industrielle. Les données relevées dans la bibliographie actuelle font preuve d'une grande variabilité. En Allemagne de l'Ouest, en zone rurale, ils sont de  $28$  à  $35 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$  et en zone industrielle de  $227 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$  (RUSSEL COLEMAN, 1965). En Grande-Bretagne et en Irlande, les apports moyens de soufre par les pluies varient de  $20$  à  $125 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$  (MARTIN, 1980). A Rothamsted, Saxmundhan et Woburn, les dépôts sont de  $50$  à  $75 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$  (KEIT *et al.*, 1986). Les apports par les pluies sont de  $30 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$  à Châlons-sur-Marne, et de  $38 \text{ kg.ha}^{-1}.\text{an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$  à Clermont-Ferrand. En dehors des phosphates, les engrais minéraux apportant du soufre sont surtout le sulfate d'ammonium (60 % de  $\text{SO}_3$ ), le sulfate de potassium (45 % de  $\text{SO}_3$ ) et le sulfate de magnésium (50 % de  $\text{SO}_3$ ). Il est à noter qu'en Champagne crayeuse, pour remédier à la déficience magnésienne, le magnésium est apporté sous forme de sulfate. Il en résulte des apports importants de soufre expliquant la rareté des situations carencielles en cet élément.

## MATÉRIEL ET MÉTHODES

En France, la dynamique du soufre est étudiée sur quatre dispositifs lysimétriques (Tab. I) dans des sols remaniés à Quimper, Versailles et Clermont-Ferrand et en sol non remanié à Châlons-sur-Marne.

Tableau I : Caractéristiques des lysimètres et précipitations moyennes annuelles.  
*Characteristics of lysimeters and average yearly rains.*

Lieux et périodes	Caractéristiques L × l × P . m	Types de sols	Précipitations mm
Quimper 1954-1965	1,41 × 1,41 × 0,9	Granitique	1 090
Versailles 1973-1988	1 × 1 × 1,5	Limoneux	660
Clermont-Ferrand 1959-1966	1,41 × 1,41 × 1,6	Argilo-calcaire	570
Châlons-sur-Marne 1977-1982	2 × 2 × 2	Rendzine	630

— A Quimper (COPPENET, 1969), le dispositif comprend huit compartiments en béton. Chaque case carrée mesure 1,41 m de côté pour une profondeur de 1 m. Chaque cuve a été remplie par tranche de 10 cm d'une terre de culture de la région quimpéroise. Après le tassement, la hauteur effective de terre était de 0,90 m. Le sol granitique est riche en matières organiques (13,4 %). Sous le climat océanique très accusé, les précipitations annuelles moyennes sont de 1 090 mm (1954-1965). Les cultures sont à dominante de graminées (blé, avoine, orge, maïs) et pomme de terre.

— A Versailles, les cases étudiées par BASTISSE (1951) ont été modifiées en 1955 : 24 cases carrées de 2 m<sup>2</sup> de surface ont 1,50 m de profondeur. Le sol de remplissage, uniforme sur l'ensemble du profil est un sol limoneux (horizon B). Sous le climat de l'Île de France, la hauteur des précipitations annuelles est en moyenne de 660 mm pendant la période de 1973 à 1988 (Madame BONIFACE, communication personnelle). La rotation des cultures est biennale (maïs - blé).

— A Clermont-Ferrand, Mon Désir (GACHON, 1972), le dispositif comprend 24 cases en ciment armé d'une section carrée de 2 m<sup>2</sup> et de 1,60 m de profondeur. Six cases ont été chargées, en 1952, d'un sol argilo-calcaire de Limagne de 0,85 m d'épaisseur reposant sur un substratum grossier (gravillons de 20-25 mm). Sous climat continental, les précipitations annuelles sont de 570 mm pour la période de 1952 à 1966. En raison des faibles précipitations hivernales et de la forte capacité de rétention pour l'eau du sol, seules ces six cases ont une période de drainage. La succession de cultures est formée par des céréales et des plantes sarclées (blé, orge d'hiver, betterave sucrière, orge de printemps, luzerne, dactyle, pomme de terre, blé, ail, fétuque, tournesol).

— A Châlons-sur-Marne, le dispositif a été décrit par DUTIL (1981) ; on rappellera les caractères essentiels relatifs à son originalité. Chaque lysimètre représente un cube de 2 m d'arête, entouré de parois imperméables. Le sol ainsi isolé est une rendzine brune sur craie à poches de cryoturbation. Ce monolithe repose sur deux demi-plaques d'acier inoxydable préperforées, à travers lesquelles coulent les eaux de drainage. Dans un climat semi-océanique à influence continentale, les précipitations annuelles moyennes sont de 630 mm. Les cases sont cultivées dans une rotation de betteraves sucrières et de blé.

Sur les eaux de drainage des lysimètres de Châlons-sur-Marne, les dosages de soufre sont effectués par néphélométrie du sulfate de baryum (norme AFNOR T. 90-040) ; les dosages colorimétriques de nitrates sont effectués en flux continu

après réduction des nitrates en nitrites sur colonne cadmium-cuivre (norme AFNOR T. 90-012). Les équilibres chimiques des eaux de drainages des lysimètres ont été déterminés en utilisant le programme GEOCHEM. Le calcul a été effectué au Département des Sciences du Sol (Pr. LAUDELOUT) de l'Université Catholique de Louvain-la-Neuve. Ce programme calcule les équilibres chimiques dans la solution du sol en tenant compte des principales réactions susceptibles de se produire dans ce milieu.

Tous les résultats des apports et des pertes en soufre sont présentés en  $\text{SO}_3$ , selon la réglementation française (loi du 13 Juillet 1979, décret d'application 80478 du 16 Juin 1980). Pour permettre des comparaisons, en fonction de la pluie et du lessivage, les résultats seront également présentés en  $\text{g.mm}^{-1}$ , soit en g par mm d'eau drainée, grandeur qui a la dimension d'une concentration (1 mm d'eau étant égal à 1 l d'eau sur 1  $\text{m}^2$ ). Dans les figures où sont comparées la dynamique du soufre et de l'azote en sols nu et enherbé, la présentation est faite en S et en N, pour rester dans une échelle du même ordre de grandeur.

## RÉSULTATS

### A) LES PERTES MOYENNES ANNUELLES EN SOUFRE

Depuis plusieurs décennies, les pertes en soufre par drainage ont été mesurées dans des lysimètres correspondant à des situations pédoclimatiques et culturales variées (Tab. II).

Lieux et périodes	Apports par les engrais	Pertes par drainage
Quimper 1954-1965	inconnus	50
Versailles 1973-1988	40*	75
Clermont-Ferrand 1959-1966	190	193
Châlons-sur-Marne 1977-1982	338	340

Tableau II :

Apports et pertes moyennes en soufre mesurées en lysimètres cultivés, en  $\text{kg.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$ .

*Contribution and average leaching losses measured on cultivated lysimeters, in  $\text{kg.ha}^{-1}\text{.yr}^{-1}$  of  $\text{SO}_3$ .*

\* Sans apport de soufre par les engrais depuis 1978

— A Quimper, les apports en soufre ne sont pas précisés, mais la perte moyenne mesurée est de  $50 \text{ kg.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$  (COPPENET, 1969).

— A Versailles, les apports par les engrais ont été de  $40 \text{ kg.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$  jusqu'en 1977. Depuis 1978, ils ont été interrompus. La perte est de  $75 \text{ kg.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$  (Madame BONIFACE, communication personnelle).

— A Clermont-Ferrand, Mon Désir, jusqu'en 1958, aucun apport d'engrais minéraux soufrés n'a été effectué. A partir de 1959, les apports de soufre par les engrais sont en moyenne de  $190 \text{ kg.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$ . La perte moyenne est de  $193 \text{ kg.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$  (GACHON, 1972).

— A Châlons-sur-Marne, les apports en soufre par les engrais sont de  $338 \text{ kg.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$ . La perte par drainage est de  $340 \text{ kg.ha}^{-1}\text{.an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$ . Cette perte apparaît comme la plus élevée (BALLIF et MULLER, 1985). Ces résultats montrent que lorsque les apports sont importants, et comptabilisés sur une période de temps suffisante, les pertes par drainage sont pratiquement équivalentes aux apports.

B) RELATION ENTRE LE VOLUME DRAINÉ ET LES PERTES EN SOUFRE PAR DRAINAGE

Pour analyser avec plus de précision les pertes par drainage, nous avons montré (BALLIF et MULLER, 1985) qu'il est préférable de substituer, au pas de temps fixe que constitue le mois ou l'année, un pas variable lié au volume drainé. Les quantités cumulées exportées par le drainage sont alors représentées en fonction des volumes cumulés drainés. Cette relation est linéaire, lorsque les valeurs de la concentration de l'élément considéré ne varient pratiquement pas. Par exemple, à Châlons-sur-Marne, en sol nu, pour la période 1982-1988, avec 135 mesures, la concentration moyenne en soufre est de  $27,95 \pm 4,0 \text{ mg.l}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$ . Dans ce cas, le système a atteint un régime stationnaire, et le rapport entre les entrées et les sorties est constant. Ce mode de représentation permet de définir ou non, sur une période donnée, un régime permanent. Ce genre d'analyse a été effectué pour des lysimètres cultivés et nus de Châlons-sur-Marne et de Versailles.

A Versailles (Fig. 1), en sol cultivé, sans apport de soufre par des engrais depuis 1978, la relation entre les pertes et les volumes drainés cumulés varie en fonction du temps. Le stock du sol en soufre s'épuise progressivement. La quantité perdue par millimètre de drainage évolue au cours du temps de la manière suivante :

- de 1972 à 1978, la quantité lixiviée est égale à  $0,100 \text{ g.mm}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$  ;
  - de 1978 à 1983, la quantité lixiviée est égale à  $0,073 \text{ g.mm}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$  ;
  - de 1983 à 1988, la quantité lixiviée est égale à  $0,023 \text{ g.mm}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$  ;
- traduisant un épuisement lent et progressif d'un stock disponible.

En sol nu, sans fourniture de soufre autre que par les apports atmosphériques, depuis le début des mesures (1972), la relation entre les pertes et les volumes drainés cumulés est linéaire. La valeur de la quantité perdue annuelle moyenne par mm de drainage est de  $0,010 \text{ g.mm}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$ .

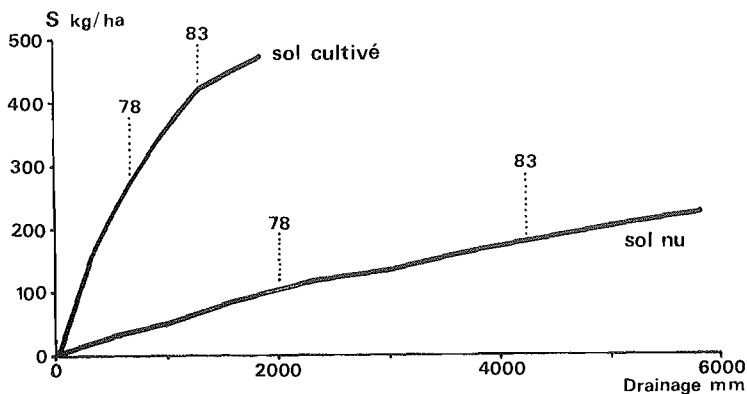


Figure 1 : A Versailles : comparaison des pertes cumulées en soufre en sols nu et cultivé, pendant la période de Septembre 1972 à Août 1988.

At Versailles : comparison of total leaching losses in sulfur in bare and fertilized soils, during the period from September 1972 to August 1988.

A Châlons-sur-Marne, en sol nu, sans apport par des engrais, on observe la même relation. Depuis 1982, la quantité perdue par millimètre de drainage est de  $0,0025 \text{ g.mm}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$ .

## C) ÉQUILIBRES CHIMIQUES DES EAUX DE DRAINAGE

Les équilibres chimiques de quelques collectes d'eaux de drainage des lysimètres de Châlons-sur-Marne sont déterminés en utilisant le programme GEOCHEM. L'étude de la distribution primaire des métaux et ligands se rapportant à l'anion sulfate montre que le ligand libre  $\text{SO}_4$  est l'espèce dominante. Il présente 75 et 90 pour cent des sulfates de la solution du sol suivant les lysimètres. La proportion de sulfates liés au calcium varie entre 10 et 22 pour cent. Les sulfates liés au magnésium, sodium et potassium sont présents en quantité très faible, inférieure à 1 pour cent. Il n'y a jamais de sulfate précipité. Le tableau III donne à titre d'exemple la distribution des métaux et ligands pour une décade.

Tableau III : Distribution primaire des métaux et ligands (en %). Troisième décade de février 1981.

*Primary distribution of metals and ligands (in %). Third decade of february 1981.*

Lysimètre n° Occupation du sol	3 cultivé	4 enherbé	6 nu
$\text{SO}_4$ ligand libre	77,2	89,3	85,2
$\text{SO}_4$ lié à Ca	22,0	10,2	14,2
$\text{SO}_4$ lié à Mg	0,5	0,3	0,4
$\text{SO}_4$ lié à Na	0,2	0,2	0,1
$\text{SO}_4$ lié à K	0,0	0,0	0,0

C'est en condition naturelle (sols enherbé ou nu), sans apport de sulfates par les engrais, que la forme libre  $\text{SO}_4$  est la plus élevée. Pour les sulfates liés au calcium, la situation est inverse : les contributions les plus élevées sont observées en milieu cultivé.

Une simulation effectuée en système fermé avec précipitation permise ou non, montre qu'il n'y a pratiquement pas d'effet sur la répartition des différentes espèces de sulfates. En système ouvert, pour différentes pressions partielles en  $\text{CO}_2$ , la diminution de la pression partielle de  $\text{CO}_2$  se traduit par une augmentation des formes libres de sulfates.

## D) POSSIBILITÉS D'ÉTABLIR UN BILAN ANNUEL

En régime stationnaire, il est possible d'établir un bilan entrées-sorties, sans faire intervenir les variations du stock du sol. A Châlons-sur-Marne, pour le lysimètre cultivé dans la rotation betterave-blé, la période comprise entre 1977 et 1982 (5 campagnes) répond à cette condition. L'examen du bilan fait apparaître deux postes importants : l'un pour les entrées, les apports par les engrais, en moyenne  $301 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$  ; l'autre pour les sorties, les pertes par drainages,  $340 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$ . Les autres postes, apports par les pluies et exportations par les récoltes sont faibles : respectivement 36 et  $17 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$ . La balance entrées-sorties s'établit en moyenne annuelle avec un déficit de  $17 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$ , représentant seulement 5 pour cent des entrées (Tab. IV). Dans ces conditions, on peut considérer que le bilan est bouclé de manière satisfaisante. D'autres résultats ont été obtenus à Rauischolzhausen, entre 1968 et 1974, en sol cultivé, où le bilan fait apparaître un déficit de  $75 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$ . Ce déficit est comblé par les apports atmosphériques aussi importants que ceux ( $70 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$ ) des pluies (KUHN et WELLER, 1977). Egalement

à Limburgerhof, le bilan en soufre est fortement négatif (JURGENS-GSCHWIND et JUNG, 1979).

Entrées (E)	
Pluies	36
Engrais	301
Phyto	3
Total	340
Sorties (S)	
Récoltes	17
Drainages	340
Total	357
Bilan = E - S	- 17

Tableau IV : Bilan annuel moyen du soufre, évalué sur la période 1977-1982, à Châlons-sur-Marne. Résultats en  $\text{SO}_3$   $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$ , pour un volume drainé moyen de  $190 \text{ mm}\cdot\text{an}^{-1}$ .

*Annual balance input-output of sulfur, 1977-1982, at Châlons-sur-Marne. Results in  $\text{SO}_3$   $\text{kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{yr}^{-1}$ , for a average drained bulk to  $190 \text{ mm}\cdot\text{yr}^{-1}$*

Sur les autres dispositifs lysimétriques, les données disponibles, pendant une période de temps suffisante, sont souvent limitées et certaines manquent pour pouvoir établir un bilan. A Quimper, les apports par les pluies et les engrais ne sont pas explicités. A Versailles, les apports par les pluies ne sont pas mesurés. Dans ces deux dispositifs, les exportations en soufre par les végétaux cultivés manquent. A Clermont-Ferrand, les différents postes du bilan sont donnés avec plus de précision. Les apports de soufre par les pluies ( $38 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$ ) compensent une partie des exportations des cultures ( $50 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}\cdot\text{an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$ ).

### E) MINÉRALISATION - ORGANISATION COMPARAISON ENTRE LE SOUFRE ET L'AZOTE

Ces résultats posent la question de l'importance de la minéralisation et de l'organisation du soufre dans le sol. L'analyse de la cinétique du lessivage de cet élément, et la comparaison avec l'azote sous deux modes d'occupation du sol, permettent d'obtenir des informations sur ce phénomène.

*En sol nu* (Fig. 2), sur onze campagnes (1977-1988), on note une perte en azote par drainage considérable :  $1440 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ , les apports par les pluies étant de  $176 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$ . Cette perte est plus importante que celle en soufre ( $790 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de S, soit  $1975 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$ ). Depuis 1982, la perte moyenne annuelle est de  $80 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  en N et de  $35 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  en S, soit  $87 \text{ kg}\cdot\text{ha}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$ .

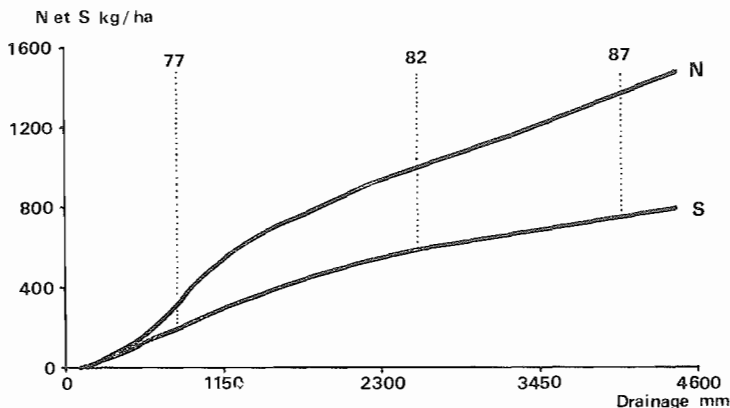


Figure 2 : A Châlons-sur-Marne : pertes cumulées en soufre et en azote en sol nu, pendant la période d'Octobre 1974 à Septembre 1988.

*At Châlons-sur-Marne : total leaching losses in sulfur and in nitrogen in bare soil, during the period from October 1974 to September 1988.*

En sol enherbé (Fig. 3), les pertes par drainage diffèrent fortement. Elles sont de 4 kg.ha<sup>-1</sup> en N et de 21 kg.ha<sup>-1</sup> en S, soit 54 kg.ha<sup>-1</sup> de SO<sub>3</sub>. Par rapport au sol nu, la différence des pertes représente la partie organisée par la végétation et la biomasse microbienne. Pour un même volume d'eau drainée, 2 300 l.m<sup>2</sup> par exemple, la comparaison des pertes en sol nu et en sol enherbé, pour le soufre et pour l'azote lixiviés donne les résultats suivants :

kg/ha de	Soufre lixivié	Azote lixivié
Sol nu	540	940
Sol enherbé	460	90
Différence	80	850

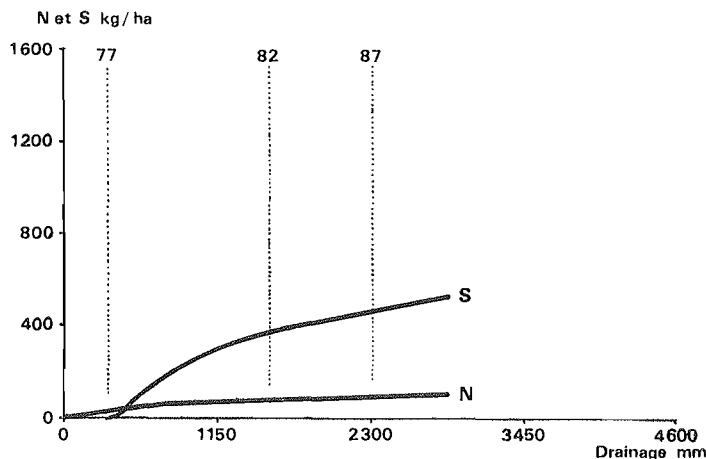


Figure 3 : A Châlons-sur-Marne : pertes cumulées en soufre et en azote en sol enherbé, pendant la période d'Octobre 1974 à Septembre 1988.

*At Châlons-sur-Marne : total leaching losses in sulfur and in nitrogen in grassed soil, during the period from October 1974 to September 1988.*

Il en résulte que l'organisation est faible pour le soufre et intense pour l'azote. Dans les deux cas, le lessivage à partir du stock minéral est toujours élevé.

Dans ce type de sol, la minéralisation et l'organisation apparente des sulfates semblent un phénomène très limité. Ce résultat confirme les observations faites par SIMON-SYLVESTRE (1969), par SAGGAR *et al.* (1981) et par SWIFT (1985). Contrairement aux idées couramment admises, les dynamiques de l'azote et du soufre sont différentes dans les rendzines. Le soufre étant peu organisé, son stockage dans le sol ne pourra être que temporaire et dépendant de l'intensité du lessivage.

## DISCUSSION

Ces résultats montrent :

— que les quantités de soufre perdu par lixiviation sont d'autant plus importantes que les apports sont élevés ;

— que la comparaison entre dispositifs est grandement facilitée si au lieu d'utiliser une relation « quantité lessivée en fonction du temps », on utilise une relation « quantité lessivée en fonction du volume drainé ». En effet, cette



représentation permet de définir des périodes de temps où le régime stationnaire est atteint ou non. Or, nous avons montré que le bilan « entrées-sorties » n'avait une signification simple qu'en régime stationnaire.

Dans ces conditions, il est possible de définir une concentration moyenne annuelle, qui est égale à la quantité lessivée par unité de volume.

Pour une année climatique moyenne, la quantité de soufre disponible peut être estimée à partir des relations suivantes :

$$\begin{aligned} \text{Quantité lessivée} &= \text{Concentration moyenne} \times \text{Drainage moyen annuel} \\ \text{Quantité lessivée} &= \text{Quantité disponible} - \text{Prélèvement par les cultures} \end{aligned}$$

Les bilans établis sur les lysimètres montrent que les exportations par les récoltes représentent moins de 5 pour cent du flux d'entrée. Dans une première approximation, on peut négliger ces prélèvements et considérer que les quantités lessivées et disponibles sont du même ordre de grandeur.

Sous un système de culture, dont on connaît la concentration moyenne annuelle de la solution du sol et le drainage moyen annuel, le calcul des quantités disponibles est possible. Le calcul appliqué à l'ensemble des lysimètres de Châlons-sur-Marne donne des quantités disponibles comprises entre 56 et 308 kg.ha<sup>-1</sup> de SO<sub>3</sub>. Les besoins des cultures estimés à partir des mobilisations (BALLIF *et al.*, 1983) sont, pour les cultures les plus exigeantes, voisins de 120 kg.ha<sup>-1</sup>.an<sup>-1</sup>. La comparaison des quantités disponibles et des besoins des cultures permet de faire les constatations suivantes (Fig. 4) : pratiquement dans presque tous les lysimètres, les quantités disponibles sont nettement supérieures aux besoins des cultures, sauf pour les lysimètres en conditions naturelles sans apport de soufre depuis 12 ans.

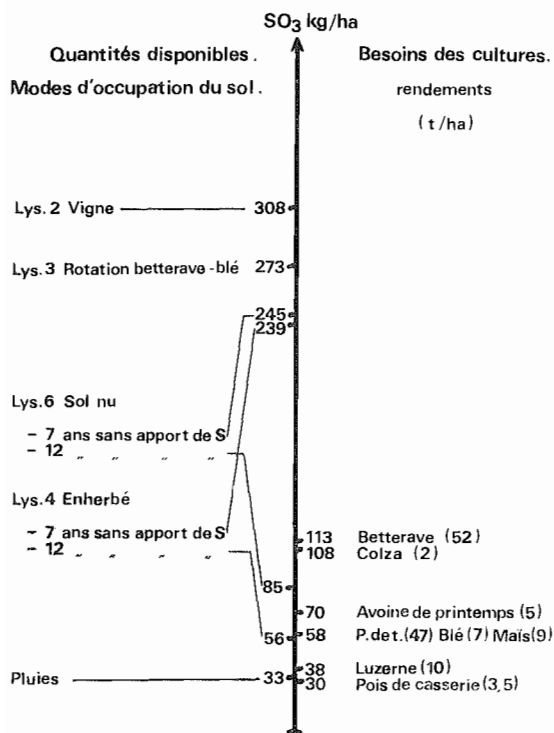


Figure 4 : A partir des lysimètres de Châlons-sur-Marne, estimation des quantités annuelles disponibles en soufre suivant différents modes d'occupation du sol ou de systèmes de culture.

Based on the Châlons-sur-Marne lysimeters, estimation of the annual available amounts of sulfur according to the various soil usages or types of farming.

Pour les systèmes culturaux utilisant des engrais simples aux doses actuellement pratiquées (rotation betterave - blé et vigne), les quantités disponibles sont toujours supérieures aux besoins.

Pour les systèmes où les apports sont limités à ceux des pluies (sols enherbé ou nu en permanence) deux situations sont possibles.

1. Après sept ans sans apport, les disponibilités sont encore largement supérieures aux besoins.

2. Après douze ans sans apport, les disponibilités ont diminué considérablement et sont légèrement inférieures aux besoins des cultures les plus exigeantes.

En l'absence de fertilisation soufrée, le risque de déficience en soufre est apparu dans d'autres situations, en France, sur colza dans les rendzines de la Champagne Berrichonne (DEJOU et MORIZET, 1967 ; STUDER, 1969), sur la luzerne en sols calcaires du type rendzine de la Charente (DELAS *et al.*, 1967), sur blé dans les régions du Centre et du Bassin Parisien (THEVENET et TAUREAU, 1987) et en Allemagne de l'Ouest (SAALBACH, 1984).

Dans une note précédente (BALLIF et MULLER, 1985), nous avons montré le rôle limité de la « minéralisation - organisation apparente » du soufre dans la dynamique de cet élément. En effet, pour le soufre, contrairement à ce qui est observé pour l'azote, la minéralisation-organisation nette est un phénomène peu important dans les rendzines sur craie, malgré une teneur élevée en soufre total ( $S = 0,69 \text{ ‰}$ ,  $N/S = 2,8$ ).

## CONCLUSION

Cette étude montre que le soufre apporté au sol (pluies, engrais, produits phytosanitaires) est exporté en majeure partie par le drainage. En l'absence de soufre provenant des fertilisants, la quantité disponible tend, sur une période vicennale, vers une valeur limite qui est la quantité apportée par la pluie, soit environ  $33 \text{ kg} \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{an}^{-1}$  de  $\text{SO}_3$ . Cette quantité est nettement inférieure aux besoins des cultures. Il convient donc d'être particulièrement attentif aux apports de soufre lors du choix des fertilisants minéraux. En effet, la comparaison de la dynamique du soufre et de l'azote, en sol de craie, met en évidence leur différence de comportement.

Le stockage du soufre sous forme minérale est possible, alors qu'il ne l'est pas pour l'azote, l'organisation du soufre étant faible, alors que celle de l'azote est importante. Il en résulte que le stockage du soufre ne sera que temporaire et dépendant de la lixiviation.

Reçu pour publication : Août 1989

Accepté pour publication : Décembre 1989

**REMERCIEMENTS** : Nous remercions M. le Professeur LAUDELOUT pour les calculs effectués avec le programme GEOCHEM.

## BIBLIOGRAPHIE

- BALLIF J.L., DUTIL P., GOBERT D. et HERRE C., 1983. — Mobilisations et exportations minérales des cultures en Champagne crayeuse. Eléments majeurs, méso-éléments, oligo-éléments et métaux lourds. Travaux Station Sc. Sol INRA, Châlons-sur-Marne. Publ. n° 100, 64 p.
- BALLIF J.-L. et MULLER J.-C., 1985. — Contribution à l'étude de la dynamique des sulfates en sol de craie : dix années de mesures en lysimètre : 1974-1984. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, t. 71, n° 12, 1395-1397.
- BASTISSE E.M., 1951. — Dix-huit années d'études lysimétriques appliquées à l'agronomie. *Ann. Agron.*, 6, 727-781.
- COPPENET M., 1969. — Résultats de douze années d'observations lysimétriques à Quimper (1954-1965). *Ann. Agron.*, 20 (2), 11-143.
- DEJOU J. et MORIZET J., 1967. — Apparition de symptômes de carence en soufre sur colza d'hiver en Champagne Berrichonne. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, t. 53, 1385-1397.
- DELAS J., DUTIL P., JUSTE C. et TAUZIN J., 1967. — Carence en soufre de la luzerne en sol de Charente. Résultats d'essais en serre. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, t. 53, 947-956
- DUTIL P., 1981. — Réalisation d'un dispositif de lysimètres pour l'étude de la migration des solutés en sol non remanié. *Colloque Humus-Azote*, Reims, 7-8 juillet, A.I.S.S.-A.F.E.S., Commissions 3 et 4, 211-216.
- GACHON L., 1972. — Les pertes en soufre par drainage. *Ann. Agron.* n° hors série, 11-20.
- JURGENS GSCHWIND S. & JUNG J., 1979. — Results of lysimeter trials at the Limburgerhof facility, 1927-1977 : the most important findings from 50 years of experiments. *Soil Science*, 127, 3, 146-160.
- GOULDING K.W., POULTON P.R., THOMAS V.H. & WILLIAMS R.J.B., 1986 — Atmospheric deposition at Rothamsted, Saxmundhan and Woburn experimental stations, England, 1969-1984. *Water, air and soil pollution*, 29, 27-49.
- KUHN H. et WELLER H., 1977. — Sechs jährige Untersuchungen über Schwefelzufuhr durch Niederschläge und Schwefelverluste durch Auswaschung (in Lysimetern). *Z. Pflanzenernaehr. Bodenk.*, 140, 431-440.
- MARTIN A., 1980. — Sulphur in air and deposited from air and rain over Great Britain and Ireland. *Environmental pollution* (Series B), 1, 177-193.
- RUSSEL COLEMAN, 1965. — The importance of sulfur as a plant nutrient in word crop production. *Soil Science*, 101, 4, 230-239.
- SAALBACH E., 1984. — Die Bedeutung der in der Atmosphäre enthaltenen Schwefelverbindungen für die Schwefelversorgung landwirtschaftlicher Nutzpflanzen. *Angew. Botanik*, 58, 147-156.
- SAGGAR S., BETTANY J.R. & STEWART J.W.B., 1981. — Sulfur transformations in relation to carbon and nitrogen in incubated soils. *Soil Biol. Biochem.*, 13, 499-511.
- SIMON-SYLVESTRE G., 1969. — Premiers résultats d'une enquête sur le soufre total des sols cultivés Français. *Ann. Agron.*, 20 (6), 609-625.
- STUDER R., 1969. — Note sur la fertilisation soufrée du colza d'hiver dans les rendzines de Champagne Berrichonne. *C.R. Acad. Agric. Fr.*, t. 55, 316-327.
- SWIFT R.S., 1985. — Mineralisation and immobilisation of sulphur in soil. *Sulphur in agriculture*. Vol. 9, 20-24.
- THEVENET G. et TAUREAU J.-C., 1987. — Le soufre et les céréales. *Perspectives Agricoles*, n° 115, 193-198.
- THIOLLET P., 1987. — Consommation des engrais azotés et soufrés. *Perspectives agricoles*, n° 115, 18-22.

our l'Etude du