

# Etude des formes d'immobilisation du soufre et de leur reminéralisation dans deux sols cultivés lorrains

JACQUIN F.\*

VONG P.C.\*\*

DIOT F.\*

## RÉSUMÉ

L'immobilisation et la reminéralisation de soufre engrais apporté sous forme de ( $^{35}\text{SO}_4$ )  $\text{K}_2$  ont été mesurées quantitativement et qualitativement par fractionnement du soufre organique en soufre-ester et soufre lié au carbone. L'étude de ces deux processus a été réalisée dans l'horizon (Ap) de deux sols agricoles.

Après une semaine d'incubation sous conditions contrôlées, on remarque une immobilisation plus importante du S engrais apporté dans un sol brun lessivé (48,7 %) par rapport à celle observée dans une rendzine (34,8 %) ; l'immobilisation est toujours plus élevée sous forme S-ester que sous forme S-C et on note une différence plus accusée pour la rendzine. En outre, il a été démontré qu'une fertilisation azotée complémentaire accroît sensiblement l'immobilisation du soufre. La comparaison du bilan du  $^{35}\text{S}$  immobilisé après cette semaine d'incubation par rapport aux quantités de  $^{35}\text{S}$  organique présentes après une culture de moutarde blanche, indique une reminéralisation globale de 38,4 % dans le sol brun lessivé contre 24,7 % dans la rendzine. Des comportements différents entre les sols ont été observés quant aux flux de minéralisation des deux compartiments organiques.

**MOTS-CLÉS** : sol cultivé - soufre - isotope - Lorraine.

## IMMOBILIZATION AND MINERALIZATION OF A SULFUR FERTILIZER IN TWO CULTIVATED SOILS OF LORRAINE

*In order to quantify the immobilization and remineralization of  $^{35}\text{S}$  applied as ( $^{35}\text{SO}_4$ )  $\text{K}_2$ , a pot experiment using the mustard (*Sinapis alba*) was performed on soil samples collected from the surface horizons (Ap) of two cultivated soils : a typic hapludalf (SBL) and a typic rendoll (RDZ).*

*After one week of incubation, the immobilization reached about 50 % (Table II, Fig. 1) in the (SBL) against only about 30 % in the (RDZ). The  $^{35}\text{S}$  had been immobilized into both organic-S fractions with a clear preference for ester-S fraction. It is important to note that if the ester-S fraction is proportionally dominant in the (SBL) with active mull, this fraction represents about three quarters of the total organic-S in the (RDZ). A complementary addition of nitrogen fertilizer as urea elicited an additional immobilization which amounted to 10 % in both soils.*

*A sulfur balance sheet performed after culture of mustard showed a similar coefficient of real utilization (CRU) by the crop developed in the two soils ; its value was about 70 %. However, a significant decrease in (CRU) by 5 % was observed when a complement of nitrogen fertilizer was applied. The low extractable  $^{35}\text{SO}_4^{2-}$  levels recovered in the soils after harvesting (< 3.5 %) made it possible to quantify the*

\* Equipe Sciences du Sol - \*\* Laboratoire Isotopes - E.N.S.A.I.A.-I.N.P.L. - 2, avenue de la Forêt de Haye, 54500 VANDOEUVRE-LES-NANCY

remineralization of S fertilizer immobilized. The total  $^{35}\text{S}$  remineralized accounted for 38.4 % in the (SBL) against 24.7 % in the (RDZ). The kinetics of S-remineralization from both organic fractions were different according to the nature of the soils and the substrates utilized. Without N addition, a similar remineralization near to 19 % occurred in both fractions present in the (SBL) while in the (RDZ), 14.1 % and 10.6 % had been remineralized from ester-S and C-bonded S fractions respectively. The ester-S fraction present in the (RDZ) appears therefore to be more labile than C-bonded S fraction.

In summary, our studies carried out under controlled conditions using an isotope tracer provided useful information about the immobilization and remineralization mechanisms occurring after fertilizing of nitrogen (JACQUIN *et al.*, 1992) and sulfur (SUHARDI, 1992). The results of this study confirmed those obtained in field experiments (DIOT *et al.*, 1990) which clearly indicated an increase in S-immobilization following a nitrogen fertilizer dressing and hence a risk of S-deficiency for crop.

**KEY-WORDS** : cultivated soil - sulfur - isotope - Lorraine.

## INTRODUCTION

Dans les sols, le soufre organique correspond, comme pour l'azote, à la forme la plus importante soit environ 90 % de la teneur globale (TABATABAI, 1984). L'immobilisation du soufre sous forme organique est répartie dans deux fractions : soufre ester (C-O-S) et soufre lié au carbone (C-S). Ces deux fractions organiques peuvent être minéralisées et les sulfates sont ensuite susceptibles d'être absorbés par la plante, fixés sur les colloïdes du sol, ou simplement lixiviés (BETTANY *et al.*, 1980 ; JOHNSON *et al.*, 1982 ; BALLIF et MULLER, 1985). Selon Mc GILL et COLE (1981), DAVID *et al.* (1982), GERMIDA *et al.* (1992), les deux fractions organiques suivent deux voies de minéralisation différentes :

1) le soufre ester (C-O-S) représente jusqu'à 60 % du soufre total (CHAE et TABATABAI, 1981) ; sa minéralisation serait dépendante d'enzymes d'origine microbienne, les sulfohydrolases, dont l'activité serait régulée par le taux de sulfates de la solution du sol. Ainsi, lors d'un apport d'engrais soufrés, on observerait une diminution de l'activité enzymatique induisant un abaissement de l'intensité de minéralisation du soufre-ester préexistant. Ce processus est dénommé : voie biochimique.

2) le soufre lié au carbone (C-S) dont la minéralisation résulterait d'une demande directe en carbone par les microorganismes. Sa biodégradation suivrait une voie classique d'oxydation : sulfures, thiosulfates, sulfates (WAINWRIGHT, 1984). Ce processus est dénommé : voie biologique.

Les mécanismes d'immobilisation-minéralisation et de transfert aux plantes sont interdépendants, donc très complexes, et le recours à l'utilisation du traceur isotopique  $^{35}\text{S}$  devient nécessaire afin d'en préciser les flux. L'un des objectifs de cette étude consistait donc à déterminer, lors d'apports conjoints ou non de fertilisants soufrés et azotés, les taux d'immobilisation du  $^{35}\text{S}$  apporté après une semaine d'incubation. Le second objectif était de mettre en évidence après développement d'une plante-test (*Sinapis alba*), l'intensité de la reminéralisation du  $^{35}\text{S}$  immobilisé dans les deux fractions organiques.

## I - MATÉRIELS ET MÉTHODES

## A) MATÉRIELS

L'étude a été effectuée sur des échantillons provenant d'horizons Ap de deux types de sols très représentés en Lorraine. Il s'agissait d'un sol brun lessivé (SBL) et d'une rendzine (RDZ) dont les principales caractéristiques chimiques sont données dans le tableau I.

Tableau I : Principales caractéristiques analytiques des horizons Ap de deux sols étudiés.

*Main analytical characteristics of the two soils studied.*

	Granulométrie			pH	C org. %	N org. %	C/N	S-ester	S-C	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>
	A %	L %	S %					mg S/kg de sol		
Sol brun lessivé (SBL)	27,3	54	16,1	5,9	1,22	0,16	7,6	111	121	9
Rendzine (RDZ)	28,6	23,5	43,6	7,9	2,37	0,23	10,3	116	130	5

## B) MÉTHODOLOGIE

## 1- Essais en vases de végétation

Le sol a été séché à l'air puis tamisé à 2 mm. Une quantité équivalente à 300 g de sol sec à 105°C a été placée dans des pots non drainés suivant deux traitements : sols enrichis en <sup>35</sup>S à la dose de 20 mg S/kg de sol, sols enrichis en <sup>35</sup>S à la même dose et en azote sous forme d'urée à raison de 70 mg N/kg de sol. Chaque traitement a été répété huit fois. Le <sup>35</sup>S a été apporté après dilution isotopique avec du sulfate de potassium non marqué ; la radioactivité introduite correspondait à 30,8 MBq/kg de sol. Après l'apport d'engrais, la moitié des pots a été ensemencée en moutarde blanche (*Sinapis alba*) à raison de 6 graines par pot. Après ajustement de l'humidité à 80 % de la capacité au champ, tous les pots ont été placés dans une cellule phytotronique présentant les conditions suivantes : température diurne 23°C, nocturne 18°C, humidité de l'air 80 %, éclairage journalier de 12 heures avec une intensité lumineuse de 12 000 lux. L'humidité du sol a été maintenue au voisinage de 80 % de la capacité au champ tout au long de l'expérience.

Après une semaine, c'est-à-dire une durée correspondant à la germination de la graine de moutarde, le sol de quatre pots non ensemencés a été retiré en vue d'investigations concernant le statut du <sup>35</sup>S. Sur les pots restant, nous avons effectué un démarrage afin de maintenir seulement trois plantes. Durant la période de germination, les plantules se nourrissant des réserves nutritives contenues dans la graine, la quantité de <sup>35</sup>S absorbé est considérée comme négligeable.

Lors de cette expérience, nous avons préféré maintenir le  $^{35}\text{S}$  minéral présent dans les sols après cette première semaine d'incubation, car d'après MAYNARD *et al.* (1983), Mc LAREN *et al.* (1985), son élimination stimule l'activité enzymatique ; de ce fait il se produit une activation artificielle de la minéralisation du  $^{35}\text{S}$  immobilisé dans la fraction S-ester. Cette perturbation entraînerait une surestimation de la reminéralisation du  $^{35}\text{S}$  organique en présence de la plante-test.

## 2 - Méthodes analytiques

- Soufre total : par oxydation alcaline avec l'hypobromite de sodium suivie d'une réduction à l' $\text{H}_2\text{S}$  puis dosage par la méthode colorimétrique au bleu de méthylène (TABATABAI et BREMNER, 1970).

- Sulfates : par extraction de 25 g de sol humide dans 50 ml de solution de phosphate monosodique 0,01 M, puis par analyse après réduction à l' $\text{H}_2\text{S}$  par l'acide iodhydrique (JOHNSON et NISHITA, 1952). Le soufre réduit a été déterminé colorimétriquement par la méthode au bleu de méthylène.

- Soufre ester : par soustraction des valeurs correspondant à la teneur en soufre réductible par l'acide iodhydrique des valeurs englobant le soufre minéral sous formes sulfatées et non sulfatées. Le soufre réductible par l'acide iodhydrique est obtenu en faisant réagir un gramme de sol avec 4 ml du mélange réducteur à l'acide iodhydrique ; ensuite le soufre réduit est mesuré comme précédemment par colorimétrie. Le soufre minéral non sulfaté s'obtient après réduction de 2 g de sol préalablement débarrassés des ions sulfates dans un mélange de 4 ml d'acide chlorhydrique et 2 g de zinc (ASPIRAS *et al.*, 1972) puis le soufre réduit est mesuré par colorimétrie.

- Soufre lié au carbone : par différence entre S total et S réductible par l'acide iodhydrique.

- Soufre  $^{35}\text{S}$  : les mesures des différentes formes de soufre s'opèrent dans l'appareil de digestion-distillation préconisé par LANDERS *et al.* (1983). Après développement d'une coloration par ajout du réactif au bleu de méthylène dans une solution de piégeage composée d'acétate de zinc et d'acétate de sodium, nous mesurons la radioactivité en prélevant 1 ml de cette solution colorée dans 10 ml d'instagel (produit Packard). Les valeurs en CPM sont converties en DPM à l'aide d'une courbe d'étalonnage dont l'efficacité de comptage varie entre 78 et 94 % selon l'intensité de coloration développée.

La signification statistique des résultats moyens de chaque traitement a été étudiée comparativement d'après le test de NEWMAN et KEULS au seuil de 5 % (STATITCF, version 3, 1987).

## II - RESULTATS ET DISCUSSION (tableau II, figure 1)

### A) STATUT GÉNÉRAL DU $^{35}\text{S}$ APRÈS UNE SEMAINE D'INCUBATION

#### 1 - $^{35}\text{S}$ sulfates

Après germination, période pendant laquelle l'absorption du  $^{35}\text{S}$  par la plante était considérée comme nulle, on constate qu'une partie importante de  $^{35}\text{S}$  apporté sous forme de  $(^{35}\text{SO}_4)\text{K}_2$  se retrouve sous forme de sulfates. La rendzine présente un taux plus élevé (57,7 %) et significativement différent de celui du sol brun lessivé se situant

à 37,9 %. Emettant l'hypothèse d'absence de reminéralisation du  $^{35}\text{S}$  immobilisé durant cette courte période d'une semaine, ces résultats démontrent clairement l'aptitude différente de ces deux sols à provoquer l'immobilisation de l'engrais soufré.

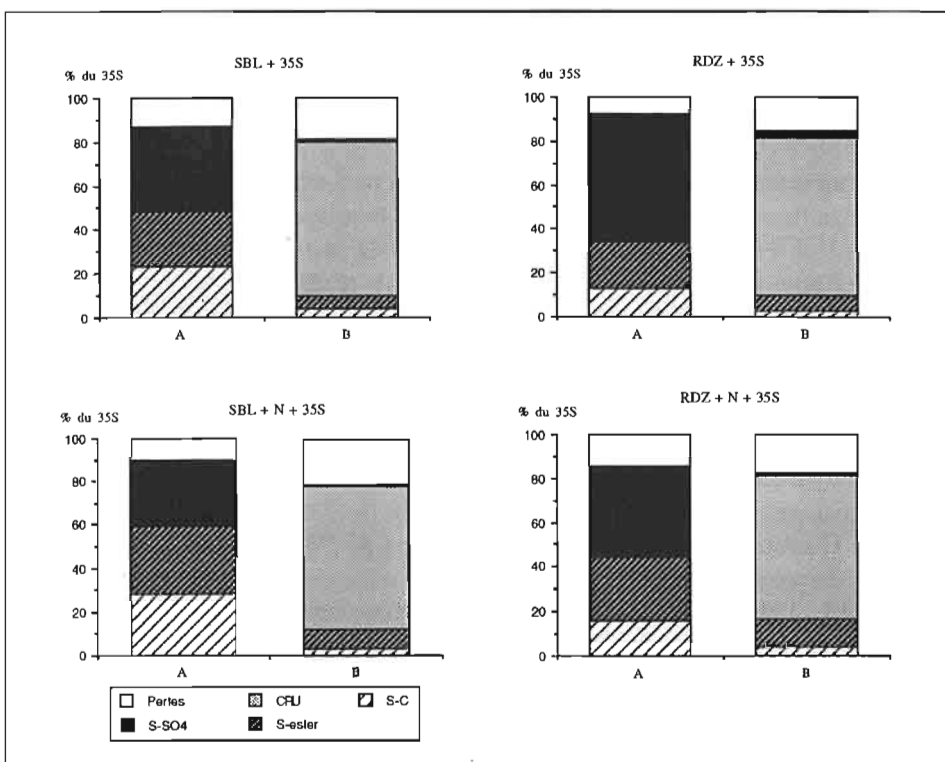
L'apport complémentaire de fertilisant azoté sous forme d'urée provoque une diminution des teneurs de  $^{35}\text{S}$  sous forme de sulfates : les valeurs se situent alors respectivement à 30,2 % dans le sol brun lessivé et à 40,8 % dans la rendzine et sont statistiquement différentes.

Ces résultats obtenus en laboratoire confirment ceux observés en plein champ révélant une diminution des teneurs en soufre minéral consécutive à un apport d'engrais azoté (DIOT *et al.*, 1990).

## 2 - $^{35}\text{S}$ organique

L'immobilisation du  $^{35}\text{S}$  minéral sous formes organiques est très rapide ; après une semaine, elle est globalement plus importante dans le sol brun lessivé où le taux atteint 48,7 % que dans la rendzine où cette valeur se limite à 34,8 %.

Figure 1 : Répartition du  $^{35}\text{S}$  après germination et après récolte de la moutarde  
Distribution of  $^{35}\text{S}$  after germination and harvesting of mustard



A : après une semaine d'incubation (germination)

B : à la récolte

CRU : coefficient réel d'utilisation

SBL : sol brun lessivé

RDZ : rendzine

L'apport d'azote accroît les taux du  $^{35}\text{S}$  immobilisé tout en maintenant une valeur nettement supérieure dans le sol brun lessivé, soit 58,9 % contre 44,5 % pour la rendzine. Les augmentations sont sensiblement identiques et correspondent à une valeur moyenne de l'ordre de 10 % indépendante du type de sol.

### 3 - Bilan global

Le bilan global du  $^{35}\text{S}$  fait état de pertes de l'ordre de 7 à 15 % du  $^{35}\text{S}$  apporté, soit une moyenne de 11 % ; cette valeur est très proche de celle obtenue par LANDERS *et al.* (1983) lesquels indiquent un défaut de bilan de l'ordre de 13 %. Il nous faut signaler que les pertes dues à la volatilisation sont généralement négligeables dans les milieux contrôlés (BANWART et BREMNER, 1974 ; MAYNARD *et al.*, 1983).

### 4 - Formes du $^{35}\text{S}$ organique

#### a) soufre-ester

Nous constatons pour les deux sols des valeurs plus élevées en S-ester par rapport à celles du S-lié au carbone ; ce fait indique clairement l'existence d'un lien plus direct entre les ions sulfates et la fraction soufre-ester. Ces résultats sont conformes à ceux retrouvés dans la littérature. Selon CHAE et TABATABAI (1981), BETTANY et STEWART (1983), le pourcentage de cette fraction varie de 27 % pour atteindre une valeur de 78 % dans certains horizons superficiels de sols forestiers très organiques et riches en biomasse microbienne. Ce soufre-ester composé de phénols-sulfates, choline-sulfates, esters-sulfates et lipides-sulfates (Mc LAREN et SWIFT, 1977 ; MAYNARD *et al.*, 1984) est considéré comme la fraction la plus labile.

Lors d'un apport unique d'engrais soufré, les taux de S-ester retrouvés présentent des valeurs significativement plus élevées dans le sol brun lessivé (25,2 %) que dans la rendzine (21,3 %). L'addition d'azote élève les taux du soufre-ester de l'ordre de 5,6 % dans le sol brun lessivé pour atteindre 7,1 % dans la rendzine ; dans ce dernier sol à mull carbonaté riche en matière organique résiduelle, la fertilisation azotée aurait favorisé le développement de champignons qui seraient en partie responsables de cette élévation (SAGGAR *et al.*, 1981 ; FITZGERALD *et al.*, 1982).

#### b) soufre lié au carbone

Nous remarquons que les pourcentages du  $^{35}\text{S}$  trouvés dans cette fraction sont significativement plus élevés dans le sol brun lessivé (23,5 %) que dans la rendzine (13,5 %). Conformément à la bibliographie, les taux du  $^{35}\text{S}$  incorporés dans la fraction S-lié au carbone augmentent lorsque l'activité microbienne s'accroît (SCHINDLER et MITCHELL, 1987). Cette fraction composée d'acides aminés soufrés, de protéines et de composés hétérocycliques est par nature moins biodégradable (STEVENSON, 1982 ; MAYNARD *et al.*, 1984) ; sa réduction par l'acide iodhydrique nécessite préalablement une attaque acide ou alcaline. Nos résultats confirment une activité biologique plus intense et différente dans le sol brun lessivé par rapport à la rendzine riche en  $\text{CaCO}_3$  (JACQUIN *et al.*, 1980 ; JACQUIN, 1985).

Une fertilisation azotée complémentaire élève les valeurs de cette forme de 4,6 % dans le sol brun lessivé et de 2,6 % dans la rendzine.

Tableau II : Répartition du <sup>35</sup>S après une semaine d'incubation et après récolte de la moutarde.  
*Distribution of <sup>35</sup>S after one week of incubation and harvesting of mustard.*

Traitements	Stades	S-ester	S-C	S-SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	S-Plante	Pertes
SBL+ <sup>35</sup> S	Germination	(1)25,2±1,3(2) (b)	23,5 ± 1,6 (b)	37,9 ± 2,6 (b)		13,4 ± 2,3
	Récolte	5,9 ± 0,4 (d)	4,4 ± 2,3 (a)	1,2 ± 0,7 (b)	69,4 ± 2,0 (ab)	19,1 ± 2,6
	Différence(3)	-19,3 ± 1,3 (a)	-19,1 ± 1,9 (b)			
RDZ+ <sup>35</sup> S	Germination	21,3 ± 2,4 (c)	13,5 ± 2,7 (c)	57,7 ± 3,7 (a)		7,5 ± 3,1
	Récolte	7,2 ± 0,3 (c)	2,9 ± 1,5 (a)	3,5 ± 0,9 (a)	71,4 ± 1,2 (a)	14,9 ± 2,4
	Différence	-14,1 ± 2,1 (b)	-10,6 ± 1,7 (c)			
SBL+N+ <sup>35</sup> S	Germination	30,8 ± 1,3 (a)	28,1 ± 2,0 (a)	31,4 ± 2,7 (c)		10,3 ± 1,5
	Récolte	8,8 ± 0,4 (b)	3,2 ± 0,7 (a)	0,7 ± 0,6 (b)	65,7 ± 2,95 (bc)	21,5 ± 3,9
	Différence	-22 ± 1,2 (a)	-24,9 ± 2,1 (a)			
RDZ+N+ <sup>35</sup> S	Germination	28,4 ± 2,0 (a)	16,1 ± 1,5 (c)	40,8 ± 1,9 (b)		14,5 ± 2,8
	Récolte	12,1 ± 1,1 (a)	4,6 ± 1,1 (a)	1,6 ± 0,6 (b)	64,3 ± 2,86 (c)	17,5 ± 3,8
	Différence	-16,3 ± 1,9 (b)	-11,5 ± 1,7 (c)			

SBL : sol brun lessivé, RDZ : rendzine

(1) les valeurs sont exprimées en pourcentage du <sup>35</sup>S apporté sous forme de (<sup>35</sup>SO<sub>4</sub>) K<sub>2</sub>

(2) écart-type : n = 4

(3) différence exprimant la reminéralisation des composés immobilisés sous formes organiques  
 - Pour chaque stade correspondant aux différents traitements, les valeurs suivies par la même lettre ne sont pas significativement différentes au seuil de 5%.

## B) STATUT GÉNÉRAL DU <sup>35</sup>S APRÈS CULTURE

Afin de ne pas activer la reminéralisation du <sup>35</sup>S immobilisé dans la fraction S-ester, nous rappelons que le <sup>35</sup>S minéral présent dans le sol après une semaine d'incubation n'a pas été éliminé (Mc LAREN *et al.*, 1985). L'étude comparative du statut du <sup>35</sup>S après une semaine d'incubation et de celui après la récolte nous permet d'estimer, compte tenu de l'absorption par les plantes et des faibles teneurs de <sup>35</sup>S minéral présent dans le sol à la récolte, l'intensité de la reminéralisation du <sup>35</sup>S immobilisé dans les fractions organiques.

### 1 - Coefficient réel d'utilisation (CRU)

En présence de soufre seul, les pourcentages de <sup>35</sup>S retrouvés dans les parties aériennes et les racines ne sont pas significativement différents et se situent pour les deux sols autour de 70 %.

Un apport complémentaire d'azote n'entraîne pas non plus une différence significative des valeurs de CRU dans les deux sols ; elles correspondent à une moyenne de l'ordre de 65 % du <sup>35</sup>S apporté. Pour la durée végétative de la plante-test étudiée, l'action de l'azote sur l'immobilisation du soufre est donc manifeste et entraîne une chute significative du CRU de 5 %.

## 2 - pertes

Sous culture, les pertes du  $^{35}\text{S}$  sont légèrement amplifiées et correspondent à une augmentation de 6,5 % par rapport aux pertes maximales de 15 % observées dans les traitements sans plante. Ces pertes supplémentaires seraient dues en partie au séchage des plantes ; en effet, les travaux de RANDALL et SAKAI (1983) ont bien montré que les pertes se produisaient lorsque la température de séchage est supérieure à 65°C. Les pertes en  $^{35}\text{S}$  varieraient en fonction des espèces végétales et pourraient atteindre 6 % de S total des plantes ; dans notre étude les plantes ont été séchées pendant 72 heures à 70°C.

## 3 - $^{35}\text{S}$ -sulfates

Sans apport d'azote, les taux de  $^{35}\text{S}$ -sulfates présents après la récolte sont très faibles et restent inférieurs à 3,5 %. On constate que ces taux diminuent encore pour se situer au-dessous de 1,6 % lorsqu'un complément d'engrais azoté a été apporté.

## 4 - $^{35}\text{S}$ -organique : $^{35}\text{S}$ -ester et $^{35}\text{S}$ -lié au carbone

Globalement, on constate une baisse des teneurs du  $^{35}\text{S}$  présent sous formes organiques ; elle atteint 38,4 % dans le sol brun lessivé et 24,7 % dans la rendzine. Par rapport à la rapidité d'immobilisation du  $^{35}\text{S}$  observée précédemment, ces diminutions très importantes révèlent donc qu'une réorganisation sous formes organiques n'empêche pas une forte biodisponibilité à moyen terme. Comme pour l'immobilisation, on peut constater que ce mécanisme de reminéralisation est plus marqué dans le sol brun lessivé.

En présence d'azote, la hiérarchie de reminéralisation en fonction des types de sol se conserve avec des diminutions plus importantes dans le sol brun lessivé (46,9 %) que dans la rendzine (27,8 %). La reminéralisation plus élevée du  $^{35}\text{S}$  immobilisé en présence d'apport complémentaire d'engrais azoté correspondrait à l'augmentation des composés organiques néosynthétisés par la biomasse microbienne.

Si on précise les rythmes de reminéralisation à partir des deux fractions organiques, il apparaît de nettes différences selon les types de sols. Dans la rendzine, la reminéralisation par voie biochimique est prédominante ; on constate toujours une diminution plus accusée de la fraction S-ester par rapport à celle liée au carbone ; les valeurs obtenues sont de (- 14,1 %) contre (- 10,6 %) pour le traitement soufre et de (- 16,3 %) contre (- 11,5 %) pour le traitement soufre et azote. Dans le sol brun lessivé, les deux voies de reminéralisation sont similaires et se situent à des variations négatives d'environ 19 % lorsque le sol reçoit uniquement de l'engrais soufré ; par contre, l'apport complémentaire d'azote provoque une augmentation nette de la minéralisation biologique ; une demande en carbone liée à la biomasse engendrée par l'ajout de N serait plus conséquente dans ce type de sol.

En présence de plantes, on assisterait à une demande croissante de sulfates disponibles et les mécanismes de reminéralisation se produiraient prioritairement par hydrolyse de la fraction S-ester, ce processus étant engendré par les sulfohydrolases dont l'activité est régulée par la teneur en ions sulfates de la solution du sol ; en second lieu et en parallèle on assisterait à une reminéralisation de la fraction S-lié au carbone (Mc GILL et COLE, 1981; MAYNARD *et al.*, 1985).



## CONCLUSION

L'apport d'un engrais soufré ( $^{35}\text{SO}_4$ )  $\text{K}_2$  à deux types de sols (sol brun lessivé et rendzine) a permis de suivre sous paramètres contrôlés les rythmes d'immobilisation puis de reminéralisation des ions sulfates et ceci en présence d'une plante test (*Sinapis alba*).

Le soufre immobilisé dans le sol s'incorpore dans les deux fractions organiques avec une préférence pour la fraction S-ester. Au cours d'une semaine d'incubation, ce mécanisme atteint près de 50 % dans le sol brun lessivé pour une valeur voisine de 30 % dans le sol argilo-calcaire. Il nous faut cependant mentionner que dans le sol brun à mull actif, la fraction S-ester est proportionnellement dominante et que ce compartiment représente près des trois quarts des formes organiques dans la rendzine. L'adjonction complémentaire d'un engrais azoté sous forme d'urée a provoqué une réorganisation supplémentaire de l'ordre de 10 % pour les deux types de sols.

En effectuant un bilan du statut soufré, après le développement de plants de moutarde jusqu'au stade fructification, on constate pour les deux sols un coefficient réel d'utilisation de l'engrais proche de 70 % ; on note cependant une baisse significative de 5 % en présence d'apport complémentaire d'un fertilisant azoté.

Comme à la récolte, les teneurs en ions sulfates des sols sont inférieures à 3,5 %, il nous a été possible de déterminer quantitativement les rythmes de reminéralisation de l'engrais immobilisé. Ce mécanisme atteint 38,4 % dans le sol brun lessivé contre seulement 24,7 % dans la rendzine. D'autre part, les cinétiques de reminéralisation du soufre sont très différentes et liées aux types de sols et à la nature des apports. Dans le sol argilo-calcaire, la fraction S-ester apparaît beaucoup plus labile (14,1 %) que la fraction S-lié au carbone (10,6 %) alors que dans le sol brun lessivé, la labilité de ces deux fractions est similaire sans apport complémentaire d'azote.

En résumé, ces recherches sous paramètres contrôlés à l'aide d'un traceur isotopique démontrent qu'il apparaît des similitudes et des interactions entre le comportement biochimique des sols face aux mécanismes d'immobilisation et de reminéralisation d'un fertilisant azoté (JACQUIN *et al.*, 1992) et soufré (SUHARDI, 1992) ; elles confirment des études de plein champ (DIOT *et al.*, 1990) où il a été constaté qu'une fertilisation azotée peut accroître l'immobilisation d'ions sulfates donc les risques de carence en soufre.

Reçu pour publication : Avril 1992

Accepté pour publication : Décembre 1992

## BIBLIOGRAPHIE

- ASPIRAS R.B., KEENEY D.R. and CHESTERS G., 1972. - Determination of reduced inorganic sulfur forms as sulfide by zinc-hydrochloric acid distillation. *Anal. Lett.*, 5, 425-432.
- 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. de France*, 71, 1385-1397.
- BANWART W.L., BREMNER J.M., 1974. - Gas chromatographic identification of sulfur gases in soil atmospheres. *Soil Biol. Biochem.*, 6, 113-115.
- BETTANY J.R., SAGGAR S. and STEWART J.W.B., 1980. - Comparison of the amounts and forms of sulfur in soil organic matter fractions after 65 years of cultivation. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 44, 70-75.
- BETTANY J.R. and STEWART J.W.B., 1983. - Sulphur cycling in soils. *Proceeding International Sulphur, 82 Conference*, 2, 767-785.
- CHAE Y.M. and TABATABAI M.A., 1981. - Sulfolipid and phospholipid in soils and sewage sludges in Iowa. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 45, 20-25.
- DAVID M.B., MITCHELL M.J. and NAKAS J.P., 1982. - Organic and inorganic constituents of a forest soil and their relationship to microbial activity. *Soil Sci. Soc. Amer. J.*, 46, 847-852.
- DIOT F., VONG P.C., FROSSARD E. et JACQUIN F., 1990. - Dynamique du soufre en sols cultivés lorrains : influence des conditions pédoclimatiques et de la fertilisation azotée. *COMIFER-Nancy*, 59-62.
- FITZGERALD J.W., STRICKLAND T.C. and SWANK W.T., 1982. - Metabolic fate of inorganic sulfate in soil samples from undisturbed and managed forest ecosystems. *Soil Biol. Biochem.*, 14, 529-536.
- GERMIDA J.J., WAINWRIGHT M., GUPTA V.S.R., 1992. - Biochemistry of sulfur cycling in soil. *Soil Biochemistry*, 7, G. STOTZKY and J.M. BOLLAG (eds), Marcel Dekker, INC., 53 p.
- JACQUIN F., 1985. - Dynamique de la matière organique en sols cultivés sous climats tempérés. *C. R. Acad. Agric. de France*, 6, 635-642.
- JACQUIN F., CHELOUFI H. and VONG P.C., 1992. - Immobilization and mineralization kinetics of a nitrogen fertilizer in calcareous clayey soil (rendzina). *The Science of the Total Environment*, 117/118, 271-278.
- JACQUIN F., HAIDOUTI C., MULLER J.C., 1980. - Dynamique de la matière organique en sols carbonatés cultivés. *Science du Sol*, 1, 27-36.
- JOHNSON D.W., HENDERSON G.S., HUFF D.D., LINDBERG S.E., RICHTER D.D., SHRINER D.S., TODD D.E. and TURNER J., 1982. - Cycling of organic and inorganic sulfur in a chestnut oak forest. *Oecologia*, 54, 141-148.
- JOHNSON C.M. and NISHITA H., 1952. - Microestimation of sulphur in plant materials, soils and irrigation waters. *Anal. Chem.*, 24, 736-742.
- LANDERS D.H., DAVID M.B. and MITCHELL M.J., 1983. - Analysis of organic and inorganic sulfur constituents in sediments, soils and water. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.*, 14, 245-256.
- MAYNARD D.G., STEWART J.W.B. and BETTANY J.R., 1983. - Sulfur and nitrogen mineralization in soils compared using two incubation techniques. *Soil Biol. Biochem.*, 15, 251-256.
- MAYNARD D.G., STEWART J.W.B. and BETTANY J.R., 1984. - Sulfur cycling in grassland and parkland soils. *Biogeochemistry*, 1, 97-111.

- MAYNARD D.G., STEWART J.W.B. and BETTANY J.R., 1985. - The effects of plants on soil sulfur transformations. *Soil Biol. Biochem.*, 17, 127-134.
- Mc GILL W.B. and COLE C.V., 1981. - Comparative aspects of cycling of organic C, N, S and P through soil organic matter. *Geoderma*, 26, 267-286.
- Mc LAREN R.G., KEER J.I., SWIFT R.S., 1985. - Sulphur transformations in soil using sulphur-35 labelling. *Soil Biol. Biochem.*, 17, 73-79.
- Mc LAREN R.G. and SWIFT R.S., 1977. - Changes in soil organic sulphur fractions due to long term cultivation of soil. *J. Soil Sci.*, 28, 445-453.
- RANDALL P.J., SAKAI H., 1983. - Sulfur analytical methods for soils, plants and animal samples. In : *Sulfur in S.E. Asian and S. Pacific Agriculture*. BLAIR G.J. and TILL A.R. (Eds.), Indonesia, 255-269.
- SAGGAR S., BETTANY J.R., STEWART J.W.B., 1981. - Sulfur transformation in relation to carbon and nitrogen in incubated soils. *Soil Biol. Biochem.*, 13, 499-511.
- SCHINDLER S.C. and MITCHELL M.J., 1987. - Dynamics of <sup>35</sup>S in horizons and leachates from a hardwood podosol. *Soil Biol. Biochem.*, 19, 531-538.
- STEVENSON F.J., 1982. - In : *Humus Chemistry*. A Wiley-Interscience publication, 55-92.
- SUHARDI, 1992. - *Importance du soufre organique du sol dans la nutrition soufrée du blé (Triticum aestivum L.)*. Thèse Doctorat, INPL, 150 p.
- TABATABAI M.A., 1984. - Importance of sulphur in crop production. *Biogeochemistry*, 1, 45-62.
- TABATABAI M.A., BREMNER J.M., 1970. - An alkaline method for the determination of total sulfur in soil. *Soil Sci. Soc. Amer. Proc.*, 34, 62-65.
- WAINWRIGHT M., 1984. - Sulfur oxidation in soils. In : *Advances in Agronomy*, 37, Academic Press Inc., 349-396.

