

Equilibre des nutritons soufrées et azotées de prairies, de cultures fourragères et annuelles en moyenne montagne du Massif Central

E. Triboï

L'utilisation d'engrais à faible teneur en soufre se généralise et les apports de soufre par la pluie diminuent car la teneur en SO₂ dans l'atmosphère commence à être maîtrisée. Cette évolution pose le problème du diagnostic de l'apparition de la carence en soufre et de la définition des causes qui contribuent à son apparition.

La teneur du sol en soufre est délicate à interpréter, en particulier en raison de la capacité de rétention de soufre du sol et de l'importance du soufre organique dans l'approvisionnement du « pool » minéral. C'est pourquoi on utilise actuellement de plus en plus l'analyse de plante qui, d'après SKINNER (1987) et SCHUNG (1987), offre des résultats plus fiables.

Le soufre est une partie constitutive des acides aminés (méthionine, cystéine, etc.) nécessaires à la synthèse des protéines. Ainsi, le rapport azote / soufre dans les protéines est relativement constant (environ 16) (DIJKSHOORN, VANWIJK, 1967) et peut être utilisé pour déceler une éventuelle déficience dans la nutrition

MOTS CLÉS

Azote, blé, diagnostic, exportation d'azote, exportation de soufre, fertilisation raisonnée, modélisation, orge, plantes fourragères, prairie, soufre.

KEY-WORDS

Barley, diagnosis, grassland, herbage crops, modelling, nitrogen, nitrogen removal, rational fertilization, sulphur, sulphur removal, wheat.

AUTEUR

I.N.R.A., Station d'Agronomie, 12, Avenue du Brézet, F 63039 Clermont-Ferrand cedex

soufrée. D'après SKINNER (1987), si le rapport azote / soufre est supérieur à 16, la fertilisation soufrée a un effet favorable chez les plantes fourragères. De 13 à 16, la nutrition soufrée pourrait être déficiente et la réponse aux apports de soufre aléatoire. Le même seuil critique est utilisé chez les céréales, pour la partie végétative en croissance ou les grains (BYERS, BOLTON, 1979 ; WRIGLEY et al., 1984). Ceci correspond à environ 60 mg de soufre (S) par g d'azote (N). Dans le cas des fourrages, une teneur en soufre supérieure à 100 mg S/g N est nécessaire pour ne pas limiter l'activité microbienne du rumen.

Il en résulte que la demande en soufre est liée directement à la quantité de protéines produites et que la fertilisation soufrée doit être raisonnée conjointement à la fertilisation azotée.

Or, dans les systèmes de culture pratiqués actuellement, cet aspect est souvent négligé : on s'intéresse essentiellement à la fertilisation azotée sans se préoccuper de la disponibilité en soufre qui pourrait, dans certaines conditions, devenir un facteur limitant. Dans ce cas, non seulement la production serait pénalisée, mais aussi sa qualité, par l'obtention de protéines à faible teneur en soufre (30 mg S / g N). Par exemple, en Grande-Bretagne, on a enregistré sur cultures fourragères une réponse favorable à la fertilisation soufrée dans 13 essais sur 23 durant la période 1984-1986.

En vue de déceler une éventuelle déficience en soufre et les causes de son apparition, nous avons analysé la relation entre les exportations en azote et en soufre chez différentes espèces (cultures annuelles, prairie temporaire et permanente), dans la zone de demi-montagne du Massif Central à prédominance fourragère, sous l'effet d'une très forte variation de la disponibilité en azote et en soufre, induite par le système de fertilisation utilisé.

Matériel et méthodes

1. Dispositif expérimental

Les données expérimentales proviennent du dispositif lysimétrique permanent de Theix (INRA — Station d'Agronomie), situé à l'altitude de 900 m sur le plateau cristallin des Monts Dômes, soit à 15 km au sud-ouest de Clermont-Ferrand (Puy-de-Dôme).

Le sol est brun acide, modérément lessivé, formé à partir de l'arène d'altération des granites porphyroïdes, type pédologique le plus fréquent en moyenne montagne du centre du Massif Central. Dans ce dispositif, depuis 1969-1970, trois

systèmes de culture sont comparés : prairie permanente (P.P.), prairie temporaire (P.T.) (4 à 5 ans de prairie + 2 ans de cultures annuelles) et cultures annuelles (C.A.) à prédominance d'espèces fourragères. Les espèces annuelles cultivées ont été : l'orge (1969, 1974, 1979, 1981), la vesce-avoine (1970, 1976, 1980, 1984), le seigle fourrage suivi de maïs fourrage (1971, 1977), le chou fourrager (1972, 1978), la pomme de terre (1973), le blé d'hiver (1975, 1982, 1983). Dans chaque système de culture, plusieurs épaisseurs du profil pédologique sont testées : 20, 40 et 80 cm pour P.P. ; 40, 80 et 120 cm pour P.T. ; et 40, 80, 120 et 160 cm pour C.A. Dans les cases de 80 cm de profondeur, la fumure azotée est différenciée par 4 traitements : témoin sans azote, fumure minérale (N), lisier ou fumier (F) et fumure minérale + fumure organique (LN). Les autres cases (20, 40, 120 et 160 cm) reçoivent LN. La fumure phospho-potassique est identique, mais avec une alternance des formes (super 18, super 45, KCl, K₂SO₄). Ceci induit une variation dans la disponibilité en soufre pour les plantes (tableaux 1, 2, 3).

2. Analyse des résultats

Les résultats obtenus pendant 15 années d'expérimentation (1970 à 1984) sont analysés en étudiant la relation entre les exportations (kg / ha) en soufre et en azote.

— L'analyse graphique : Sur le graphique reliant les deux exportations on a tracé la droite $N / S = 16$, choisie comme seuil de carence car il correspond à la composition des protéines végétales (DIJKSHOORN et al., 1960).

— La relation entre les exportations annuelles de soufre (S) et d'azote (N) a été assimilée à une droite :

$$S = b_0 + b_1 N$$

dans laquelle b_1 représente la quantité de soufre exporté par kilo d'azote supplémentaire apporté.

Quant à la signification de « b_0 », celle-ci doit être regardée avec prudence car ce paramètre n'est qu'une extrapolation d'une relation linéaire en dehors de son domaine de validité.

Dans le domaine réel d'expérimentation correspondant à des exportations d'azote et de soufre à la maturité (céréales) ou à la date optimale de coupe (prairie, vesce-avoine, etc.), le rapport N / S est donc :

$$N / S = (S - b_0) / S.b_1$$

Le terme $(S - b_0) / S$ étant positif et inférieur à 1, car a priori $b_0 > 0$, il résulte que $1 / b_1$ représente le rapport N / S maximal (N / S_m).

Résultats

1. La relation azote-soufre pour les peuplements prairiaux

● Cas de la prairie permanente

Pour la prairie permanente, les exportations annuelles de soufre varient de 5 à plus de 50 kg / ha, selon les exportations en azote (figure 1a). Le rapport N / S est inférieur à 16 dans la plupart des cas. Il est minimum en 1972 et 1974 à la suite des fertilisations soufrées importantes (160 à 234 kg S / ha). Il est d'environ 16 ou légèrement supérieur, ce qui éventuellement traduirait une nutrition soufrée limitante, en 1973 et 1979.

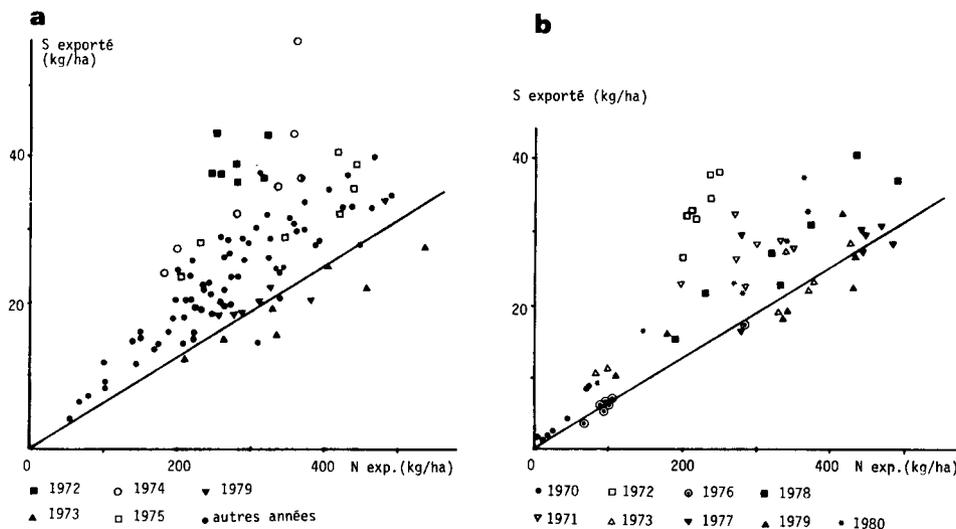


FIGURE 1 : Exportations d'azote (N) et de soufre (S) de la prairie permanente (a) et temporaire (b) (Theix, 1969-1984)

FIGURE 1 : Removals of nitrogen (N) and of sulphur (S) by (a) permanent pastures and (b) leys (Theix, 1969-1984)

La relation entre les exportations annuelles de soufre et d'azote est de forme linéaire (tableau 1). Cette relation se vérifie sur 15 ans sauf en 1972, quand la quantité d'azote exporté a été très faiblement différenciée (250 à 320 kg N). Le soufre exporté par kg d'azote supplémentaire exporté (coefficient b_1) est supérieur à 0,06 soit 60 mg S / g N, à l'exception de 1973 ($b_1 = 0,047$) et 1975 ($b_1 = 0,051$). Pour ces deux années, caractérisées par les plus fortes exportations en

	Pluie	Soufre apporté*				Forme d'engrais	S = b0 + b1 N			Rapport N/S maximal (1/b1)
		T	L	N	LN		r	b0	b1	
1970	18,1	-	8	-	8	Lisier	0,99	-2,56	0,126	7,9
1971	18,7	-	-	-	-	-	0,61	2,39	0,067	14,9
1972**	18,4	-	2	-	2	Lisier	0,02	38,8	-	5,9 - 8,5
		176	159	176	159	K ₂ SO ₄				
1973	15,5	-	6	-	6	Lisier	0,92	2,74	0,047	21,3
		42	42	42	42	Super				
1974	13,4	-	10	-	10	Lisier	0,84	5,03	0,105	9,5
		234	206	234	206	K ₂ SO ₄				
1975	16,0	-	24	-	24	Lisier	0,85	14,4	0,051	19,6
		91	55	91	55	Super				
1976	17,8	-	18	-	18	Lisier	0,97	2,72	0,072	13,9
		-	119	177	118	K ₂ SO ₄				
1977	20,8	-	15	-	15	Lisier	0,77	8,12	0,062	16,1
1978	17,3	-	7	-	7	Lisier	0,90	-0,09	0,074	13,5
1979	25,3	-	10	-	10	Lisier	0,91	-0,18	0,066	15,2
1980	29,4	-	11	-	11	Lisier	0,84	3,08	0,070	14,3
1981	26,0	-	10	-	10	Lisier	0,86	-4,54	0,113	8,8
		46	23	46	23	Super				
1982	15,9	-	16	-	16	Lisier	0,996	-0,49	0,092	10,9
		59	37	59	37	Super				
1983	14,0	-	10	-	10	Lisier	0,83	5,56	0,079	12,7
		69	45	69	45	Super				
1984	17,0	-	1	-	1	Lisier	0,86	-1,75	0,096	10,4
		33	21	33	21	Super				

* Epaisseur du sol : 80 cm. De plus, trois autres traitements sont expérimentés : LN + irrigation sur sol de 80 cm ; LN sur sol de 20 et 40 cm. Le calcul de r est effectué à partir de 7 couples, sauf 1974, 1980 et 1981 où n = 6.

** En 1972, les exportations N ont été très faiblement différenciées, de 250 à 320 kg, d'où la non validité de la relation linéaire S = f (N).

TABEAU 1 : Quantités de soufre reçues par la prairie permanente et relations entre exportations d'azote (N) et de soufre (S) (en kg N / ha et kg S / ha ; T : témoin sans apport d'azote, L : apport de lisier de 20 à 40 t / ha, N : apport d'azote minéral de 200 à 400 kg N / ha, LN : apport d'azote et de lisier)

TABLE 1 : Amounts of sulphur received by permanent pastures and relationships between removals of nitrogen (N) and sulphur (S) (kg N / ha and kg S / ha ; T : control without nitrogen ; L : dressing of organic manure, 20 to 40 t slurry / ha ; N : dressing of mineral nitrogen, 200 to 400 kg N / ha ; LN : dressing of mineral nitrogen and of slurry)

azote, le rapport N / S (1 / b₁) est respectivement de 21 et 20, ce qui pourrait correspondre à une difficulté d'approvisionnement en soufre induite par une productivité accrue. Cependant le seuil de carence n'est atteint qu'en 1973, car en 1975 le pool de soufre disponible a été plus important et a produit un enrichissement des plantes en soufre en l'absence d'une fertilisation azotée et pour des exportations similaires (210 à 260 kg N) ; en 1975, l'exportation de soufre (24 à 29 kg) a été double de celle de 1973 (12 à 15 kg). Cet enrichissement initial, probablement sous forme de SO₄, permet ultérieurement une croissance normale malgré l'augmentation de la demande résultant de la fertilisation azotée.

L'effet « enrichissement en soufre » suite à une bonne disponibilité dans le sol se reflète entre autre dans la valeur du terme b_0 . En effet, malgré l'incertitude qui plane sur la signification de ce terme, il existe une relation linéaire très significative ($p = 0,020$) entre b_0 de l'année « i » et la somme des quantités moyennes (Q) de soufre apporté dans les années i et (i-1) dans les 4 traitements (S pluie + (T+L+N+LN) / 4) :

$$b_0 = -2,1 + 0,031 Q \quad n = 13 \quad r = 0,66$$

Ceci démontre entre autre, l'importance de l'effet rémanent de la fertilisation soufrée dans nos conditions d'expérimentation.

● Cas de la prairie temporaire

Pour la prairie temporaire, les exportations en soufre et en azote sont du même ordre que pour la prairie permanente (figure 1b).

	Soufre apporté*				Forme d'engrais	S = $b_0 + b_1 N$			Rapport N/S maximal (1/b1)
	T	L	N	LN		r**	b0	b1	
Prairie temporaire									
1970	-	8	-	8	Lisier	0,99	-0,44	0,117	8,5
1971	-	-	-	-	-	0,97	15,7	0,039	25,6
1972	-	2	-	2	Lisier	0,88	-6,9	0,181	5,5
1973	176	159	176	159	K ₂ SO ₄				
	-	6	-	6	Lisier	0,93	6,4	0,049	20,4
Cultures annuelles									
1974 (orge)	-	10	-	10	Lisier				
	200	171	200	171	K ₂ SO ₄				
1975 (blé d'hiver)	-	12	-	12	Lisier				
	18	-	18	-	Super				
Prairie temporaire									
1976	-	30	-	30	Fumier	0,99	1,2	0,052	19,2
	-	17	69	17	K ₂ SO ₄				
1977	-	15	-	15	Lisier	0,61	13,7	0,034	29,0
1978	-	7	-	7	Lisier	0,94	1,56	0,078	12,8
1979	-	10	-	10	Lisier	0,85	5,14	0,049	20,4
1980	-	11	-	11	Lisier	0,95	2,38	0,082	12,2

* Epaisseur du sol = 80 cm. De plus, 3 autres traitements sont expérimentés : LN + irrigation sur sol de 80 cm, LN sur sol de 40 cm et de 120 cm.

** Les corrélations sont calculées à partir de 7 couples, sauf 1970 (n = 6) et 1971 (n = 5) (données manquantes).

TABLEAU 2 : Quantités de soufre reçues par la prairie temporaire et relations entre exportations d'azote (N) et de soufre (S) (en kg N / ha et kg S / ha ; T : témoin, L : apport de lisier, N : apport d'azote minéral, LN : apport d'azote et de lisier, doses variables selon les cultures)

TABLE 2 : Amounts of sulphur received by leys and relationships between removals of nitrogen (N) and sulphur (S) (kg N / ha and kg S / ha ; T : control, L : dressing of slurry, N : dressing of mineral nitrogen, LN : dressing of mineral nitrogen and of slurry, variable rates according to crops)

Le rapport N / S est inférieur à 16 dans la plupart des cas. La valeur la plus faible est enregistrée en 1972 (figure 1b) à la suite d'un apport de soufre supérieur à 160 kg / ha (tableau 2). Il est proche de 17 dans l'année d'installation de la prairie (1976) et dans des traitements à très forte productivité (> 300 kg N exporté) en l'absence d'une fertilisation soufrée (1979) (figure 1b).

La relation linéaire entre les exportations de soufre et d'azote est confirmée (tableau 2). Le coefficient b_1 est inférieur à 0,060 (60 mg S / g N) ou N / S max > 16 en 5 années. Cependant, le seuil de carence calculé n'est atteint que pour quelques cas particuliers (en 1973, 1976 et 1979).

	Pluie	Soufre apporté			LN	Forme d'engrais
		T	L	N		
1969 Orge	*	-	-	-	-	-
1970 Vesce-avoine	18,1	-	8	-	8	lisier
1971 Seigle fourrage + maïs fourrage	18,7	-	-	-	-	-
1972 Chou fourrager	18,4	176	159	176	159	K ₂ SO ₄
1973 Pomme de terre	15,5	42	42	42	42	lisier super
		-	6	-	6	lisier
1974 Orge	13,4	200	171	200	171	K ₂ SO ₄
1975 Blé d'hiver	16,0	-	10	-	10	lisier
1976 Vesce-avoine	17,8	-	-	51	-	K ₂ SO ₄
1977 Seigle fourrage + maïs fourrager	20,8	-	26	-	26	lisier
		-	40	-	40	fumier
1978 Chou fourrager	17,3	-	7	-	7	lisier
1979 Orge	25,3	-	10	-	10	lisier
1980 Vesce-avoine	29,4	-	23	-	23	fumier
1981 Orge	26,0	23	-	23	-	super
		-	10	-	10	lisier
1982 Blé	15,9	41	-	41	-	super
		-	24	-	24	fumier
1983 Blé	14,0	78	26	78	26	K ₂ SO ₄
1984 Vesce-avoine	17	42	-	42	-	super
		-	27	-	27	fumier

* non mesuré

TABLEAU 3 : Apports de soufre dans les systèmes « cultures annuelles » (kg S / ha ; T : témoin, L : apport de lisier, N : apport d'azote minéral, LN : apport d'azote et de lisier, doses variables selon les cultures)

TABLE 3 : Inputs of sulphur in the « annual crop » systems (kg S / ha ; T : control, L : dressing of slurry, N : dressing of mineral nitrogen, LN : dressing of mineral nitrogen and of slurry, variable rates according to crops)

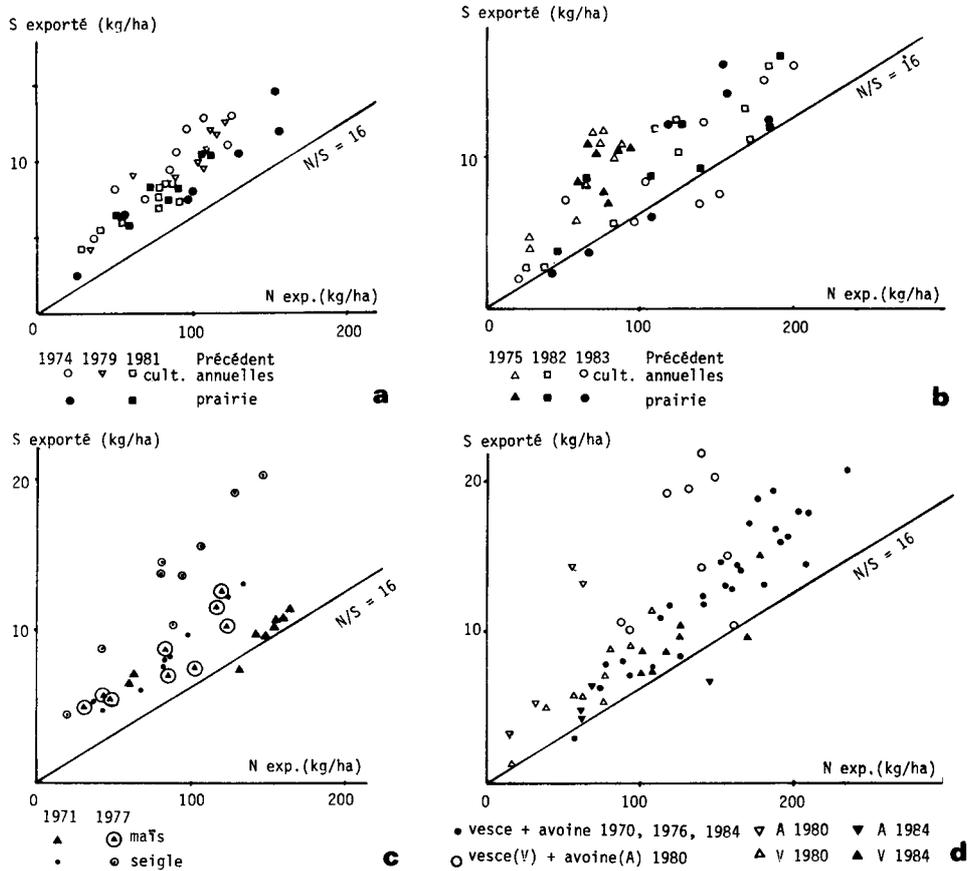


FIGURE 2 : Exportations d'azote (N) et de soufre (S) des différentes espèces annuelles cultivées : orge-grain (a), blé d'hiver-grain (b), seigle fourrage + maïs fourrage (c), vesce / avoine (d)

FIGURE 2 : Removals of nitrogen (N) and of sulphur (S) by various annual crops : (a) grain barley, (b) grain Winter wheat, (c) forage rye + forage maize, (d) vetch / oats

2. La relation azote-soufre dans le cas des plantes annuelles

● Céréales : le rapport N / S est différent dans le grain et la paille

– Chez l'orge, l'exportation en soufre dans les grains varie de 2 à 15 kg selon l'exportation d'azote (20 à 160 kg N / ha) (tableau 3). Le rapport N / S est inférieur à 16 (figure 2a).

	Année précédente	S = b0 + b1 N				Rapport N/S maximal (1/b1)
		b0	b1	n	r	
Grains	1974 CA-pomme de terre PT-prairie	3,04	0,079	9	0,91	12,7
		0,78	0,078	7	0,96	12,8
	1979 CA-chou fourrager	2,42	0,078	9	0,92	12,8
	1981 CA-vesce + avoine PT-prairie	2,69	0,062	9	0,91	16,1
		1,64	0,078	7	0,93	12,8
1974-1981 : moyenne	2,19	0,075	39	0,89	13,3	
Pailles	1974 CA-pomme de terre PT-prairie	6,19	0,185	9	0,67	5,41
		4,14	0,182	7	0,87	5,49
	1979 CA-chou fourrager	2,72	0,148	9	0,88	6,76
	1981 CA-vesce + avoine PT-prairie	1,77	0,157	9	0,90	6,36
		2,51	0,116	7	0,91	8,62
1974-1981 : moyenne	6,04	0,087	39	0,60	11,5	
Grains + pailles	1974-1981 : moyenne	5,61	0,100	39	0,85	10,0

TABLEAU 4 : Relations entre les quantités d'azote (N) et de soufre (S) exportées par l'orge (en kg / ha ; CA : système de culture à plantes annuelles, cf. tableau 3 ; PT : système de culture avec prairie temporaire, cf. tableau 2)

TABLE 4 : Relationships between removals of nitrogen (N) and of sulphur (S) by barley (kg / ha ; CA : cropping system with annual plants, cf. table 3 ; PT : cropping system with leys, cf. tableau 2)

Les exportations annuelles de soufre et d'azote sont étroitement corrélées, qu'il s'agisse du grain ou de la paille (tableau 4). Le coefficient b_1 est de 0,06 – 0,08 dans les grains, ce qui dénote une composition normale, et environ du double dans les pailles. Ceci signifie que, par rapport au soufre, l'azote est mieux mobilisé et transféré depuis les tiges vers les grains.

— Chez le blé d'hiver, on enregistre le même type de résultats que chez l'orge.

Les exportations de soufre et d'azote sont légèrement supérieures (figure 2b), avec un rapport N / S inférieur à 16 dans la plus grande partie des cas. Il est proche de 16 en 1983, malgré la fumure soufrée apportée à l'automne 1982 (> 55 kg S / ha) (tableau 3).

Les coefficients b_1 (tableau 5) dans les grains sont du même ordre que chez l'orge. En revanche, dans les pailles, b_1 est supérieur aux moins dans 4 cas, ce qui dénoterait une plus forte absorption de soufre par la partie végétative du blé et une mobilisation plus faible dans les grains.

	Année précédente	S = b0 + b1 N				Rapport N/S maximal (1/b1)
		b0	b1	n	r	
<u>Grains</u>	1975 CA-orge	0,80	0,124	9	0,88	8,1
	PT-orge	4,32	0,062	7	0,61*	
	1982 CA-orge	1,65	0,071	9	0,92	14,1
	PT-orge	2,46	0,063	7	0,87	
	1983 CA-blé	1,24	0,065	10	0,86	15,4
	PT-blé	2,94	0,065	7	0,78	
<u>Pailles</u>	1975 CA-orge	4,79	0,245	9	0,95	4,1
	PT-orge	7,86	0,104	7	0,77	
	1982 CA-orge	4,38	0,120	9	0,73	8,3
	PT-orge	4,28	0,194	7	0,89	
	1983 CA-blé	4,00	0,221	9	0,89	4,5
	PT-blé	4,10	0,218	7	0,76	

* Faible variation des exportations azotées

TABLEAU 5 : Relations entre les quantités d'azote (N) et de soufre (S) exportées par le blé d'hiver (kg / ha ; CA : système de culture à plantes annuelles, cf. tableau 3 ; PT : système de culture avec prairie temporaire, cf. tableau 2)

TABLE 5 : Relationships between removals of nitrogen (N) and of sulphur (S) by Winter wheat (kg / ha ; CA : cropping system with annual plants, cf. table 3 ; PT : cropping system with leys, cf. table 2)

● Espèces fourragères cultivées : le rapport N / S varie selon la fertilisation apportée

— La succession seigle-fourrage maïs-fourrage a été testée en 1971 et 1977 en l'absence d'un apport direct de soufre minéral (tableau 3).

Chez le seigle, le rapport N / S est inférieur à 16 (figure 2c).

La relation entre les exportations annuelles d'azote et de soufre est linéaire, avec des coefficients b_0 et b_1 supérieurs en 1977 (tableau 6). Ainsi, pour des quantités d'azote exporté similaires, la quantité de soufre exporté en 1977 est supérieure, ce qui traduirait une meilleure disponibilité du soufre dans le milieu. Dans ce cas, une partie du soufre absorbé pourrait provenir de l'apport massif de 1974 (> 180 kg S / ha).

Le maïs fourrage en 2^{ème} culture présente un rapport N / S supérieur au seigle. Il est proche de 16 en 1971, surtout dans le traitement avec un sol de faible épaisseur (40 cm, N / S = 18), ce qui confirme les résultats enregistrés sur le seigle (figure 5). Le coefficient b_1 de 1971 est de 0,039 (N / S max = 1 / b_1 = 25,6). Une carence en soufre était donc envisageable (tableau 6).

— L'association vesce-avoine a été testée durant 4 années.

		b0	S = b0 + b1 N		r	Rapport N/S maximal (1/b1)
			b1	n		
Vesce-avoine	1970	-2,94	0,113	9	0,92	8,8
	1976	-0,39	0,084	9	0,93	11,9
	1980	-	-	9	0,34 NS	6 à 10
	1984	-1,23	0,089	9	0,83	11,2
Seigle fourrage	1971	1,83	0,076	9	0,97	13,2
	1977	3,00	0,120	9	0,94	8,3
Maïs fourrage	1971	4,25	0,039	9	0,88	25,6
	1977	2,50	0,070	9	0,90	14,3
Chou fourrager	1972	-8,71	0,489	9	0,95	2,0
	1978	7,39	0,255	7	0,92	3,9

TABLEAU 6 : Relations entre les quantités d'azote (N) et de soufre (S) exportées par différentes espèces fourragères cultivées dans le système à cultures annuelles (kg / ha)

TABLE 6 : Relationships between removals of nitrogen (N) and of sulphur (S) by various forage crops under the system with annual crops (kg / ha)

Exportations	80 T			80 N			80 LN			80 LNI			
	V	A	VA	V	A	VA	V	A	VA	V	A	VA	
1980 (kg N)	145	16,1	161	62	31	93	62	56	117	69	61	131	
	(kg S)	6,9	3,5	10,4	4,8	5,3	10,1	4,8	14,4	19,2	6,4	13,1	19,5
	N/S	21,0	4,6	15,5	12,9	5,8	9,2	12,9	3,9	6,1	10,8	4,7	6,7
1984 (kg N)	179	16,1	195	102	62	163	108	75	183	112	80	192	
	(kg S)	15,2	1,3	16,5	8,6	5,8	14,4	7,6	5,4	13,0	7,1	8,9	16,0
	N/S	11,8	12,4	11,8	11,9	10,7	11,3	14,2	13,9	14,1	15,8	9,0	12,0

TABLEAU 7 : Quantités d'azote (N) et de soufre (S) exportées par les parties récoltées de la vesce (V) - avoine (A) (80 : sol de 80 cm de profondeur, T : témoin, N : fumure minérale, L : lisier, I : irrigation)

TABLE 7 : Amounts of nitrogen (N) and of sulphur (S) removed by harvested parts of a vetch (V) - oats (A) mixed crop (80 : soil with depth of 80 cm, T : control, N : mineral nitrogen, L : slurry, I : irrigation)

Le rapport N / S est inférieur à 16. il s'approche de 16 en présence d'exportations azotées faibles (environ 100 kg) (figure 2d). La relation entre les exportations d'azote et de soufre est linéaire pour 3 années (tableau 6). En 1980, elle n'est pas significative, car 4 traitements sur 9 (profondeur de sol de 80, 120, 160 cm + apport d'azote organique et minéral (LN), 80 LN + irrigation) présentent une absorption de soufre supérieure.

Parmi les deux plantes, il semble que la vesce présente un rapport N / S supérieur à l'avoine. Ceci a été très net en 1980 (tableau 7). Cette spécificité, due peut-être à une colonisation différente du sol par le système racinaire, permettrait à l'avoine d'avoir accès à des sources de soufre plus « profondes ». Cet aspect reste à confirmer.

Ainsi, le rapport N / S de l'association varierait en fonction de la compétition entre les 2 plantes et de leurs contributions relatives au rendement.

En 1980, la contribution de l'avoine a été plus importante dans les traitements « productifs », d'où le rapport N / S plus faible mentionné antérieurement.

— *Le chou fourrager* est l'espèce qui présente les plus fortes exportations en soufre : 30 à 80 kg (figure 3).

Le rapport N / S est le plus bas. Le coefficient b_1 a été de 0,489 ou 489 mg S / g N en 1972 sous l'effet d'apport direct de plus de 160 kg S / ha et de 0,255 ou 255 mg S / g N en 1978, 3^{ème} année d'effet rémanent du soufre apporté en 1974 (tableau 6).

Remarquons que dans les traitements les plus lessivés : 40 LN (sol de 40 cm d'épaisseur) et 80 Gore (sol de 80 cm d'épaisseur, très sableux, gore), le rapport N / S a augmenté jusqu'à environ 9,0 et 6,8 par rapport aux valeurs de 3,0 - 3,5 enregistrées dans les autres traitements pour des exportations azotées de 100 à 300 kg (figure 3). Dans ce cas, une carence en soufre est très probable.

Discussion

Pour déceler une éventuelle carence en soufre nous avons utilisé le rapport N / S dans les plantes, en retenant comme seuil de carence la valeur 16, justifiée en introduction.

De plus, nous avons analysé la relation entre les exportations en soufre et en azote en l'assimilant à une droite, bien que la linéarité ne soit pas toujours valable sur l'ensemble du domaine de variation. En effet, les données publiées par SALETTE (1978) montrent clairement une relation curvilinéaire au cours des repousses, ce qui dénote une interaction azote-soufre : le rapport N / S diminue avec l'augmentation des prélèvements en azote, causée par l'âge et / ou la fertilisation azotée (figure 4). Cependant, dans un domaine de variation donnée, faible de préférence, la linéarité est acceptable. Elle nous permet de calculer une pente (coefficient b_1) ayant une signification biologique : b_1 exprime la quantité de soufre exporté par kg d'azote supplémentaire exporté et $1 / b_1$ le rapport N / S maximum. Cette variable nous informe sur l'importance du phénomène de dilution dans la plante.

Les données présentées dans les figures 1 à 4 montrent une forte variation du rapport N / S en fonction du système de culture pratiqué.

Des valeurs proches de 16, nous indiquant une éventuelle déficience en soufre, ont été enregistrées en plusieurs situations :

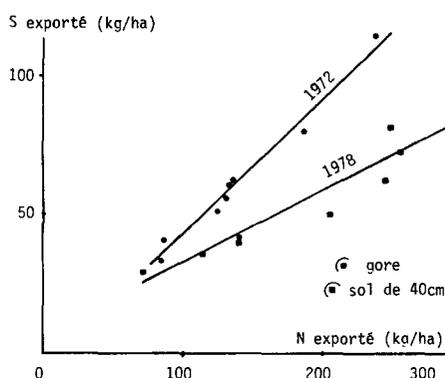


FIGURE 3

FIGURE 3 : Exportations d'azote (N) et de soufre (S) du chou fourrager

FIGURE 3 : Removals of nitrogen (N) and of sulphur (S) by forage kale

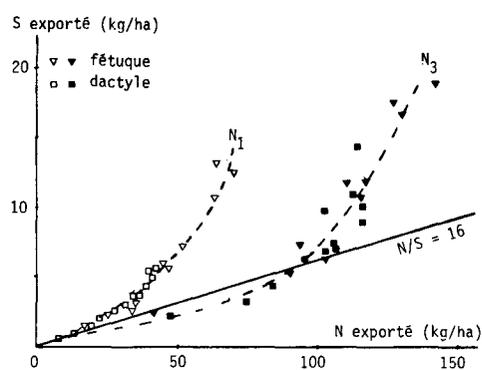


FIGURE 4

FIGURE 4 : Relation entre les cinétiques d'exportation d'azote et de soufre de la fétuque et du dactyle au cours d'une repousse (d'après SALETTE, 1978 ; N_1 : 60 kg N / ha ; N_3 : 180 kg N / ha)

FIGURE 4 : Relationship between the removal kinetics of nitrogen and of sulphur by fescue and by cocksfoot (after SALETTE, 1978 ; N_1 : 60 kg N / ha ; N_3 : 180 kg N / ha)

— Des exportations en azote faibles sur les prairies permanente et temporaire (figure 1). Ceci confirme entre autres les résultats de SALETTE (1978) qui montrent une forte diminution du rapport N / S en fonction de l'âge de la plante (figure 4). L'effet « âge » qui correspond aussi à une augmentation de la croissance et donc à des exportations en azote est dû, d'après DIJKSHOORN et al. (1982), à une augmentation de la contribution de la fraction protéique la plus riche en soufre, les protéines chloroplastiques ($N / S = 6,7$), au pool protéique total. Cependant, il n'explique pas l'amplitude des valeurs signalées par SALETTE (de 22 à 8) ou enregistrées par nous-mêmes sur la prairie temporaire de 1^{ère} année (1970, 1976, $N / S = 16$) par rapport aux années suivantes (environ 6 en 1972). L'hypothèse la plus plausible nous semble consister dans une meilleure colonisation du milieu grâce à la croissance racinaire et / ou à l'accès à d'autres sources de soufre (lessivé vers le bas du profil de sol, minéralisation de la matière organique...)

— Des exportations en azote importantes, surtout en l'absence d'une fertilisation soufrée récente (figures 1, 2), car les besoins en soufre augmentent proportionnellement avec l'azote exporté.

Des valeurs N / S faibles, de 5 à 8, qui dénotent une forte absorption de soufre et un stockage de l'azote dans la plante sous forme SO_4 , ont été enregistrées en présence d'une fertilisation soufrée importante, largement excédentaire par rapport aux besoins (prairie permanente 1972, 1974, prairie temporaire 1972).

Ces réserves peuvent assurer ultérieurement une croissance normale même si le milieu est « devenu » déficitaire. C'est le cas de situations qui présentent un coefficient b_1 faible ($1/b_1 = N/S \text{ max}$), sans cependant se trouver en carence car le rapport N/S est inférieur à 16 ; par exemple la prairie temporaire de 1971.

Soulignons aussi l'effet « plante » : les crucifères contiennent une proportion importante de soufre organique (jusqu'à 30 % du soufre total) sous forme de glucosides isothiocyanates (soufre volatile) qui explique le faible rapport N/S chez ces espèces (chou, figure 3, tableau 6).

D'autres familles de plantes, comme les Liliacées et les Ombellifères, ont la même propriété de contenir du soufre organique non lié au métabolisme protéique et présentent un rapport N/S faible (3 à 4).

Dans tous les cas, les besoins en soufre et le seuil de carence sont modifiés par rapport à la limite N/S de 16 correspondant à la proportion de soufre organique des protéines.

Enfin, l'existence d'une relation linéaire entre les exportations en azote et en soufre, démontre que la fertilisation soufrée doit être raisonnée en fonction de la fertilisation azotée. En effet, dans les limites imposées par le climat, la fertilisation azotée contrôle la quantité de protéines synthétisées par hectare et détermine donc les besoins en soufre.

La fertilisation soufrée nécessaire pour satisfaire ces besoins peut être calculée à partir de la méthode du bilan soufre au niveau de la parcelle, ainsi que le préconise HEBERT (1982).

Par rapport à l'azote, la fertilisation soufrée se raisonne avec une certaine souplesse car le sol est pourvu d'une capacité tampon importante qui s'oppose aux pertes par lixiviation. Dans nos conditions, avec un drainage moyen annuel d'environ 400 mm, il faut au moins un an pour que l'onde SO_4^- migre de 40 cm (TRIBOÏ, 1981).

Soulignons aussi que l'apport par les pluies pourrait être important. Dans notre dispositif situé à 15 km au sud-ouest de Clermont-Ferrand et en dehors de son influence « polluante », les retombées par les précipitations sont d'environ 19 kg S ha / an, soit au moins 3 fois plus faibles que sur Clermont même. Une valeur proche (15 kg / ha / an) est enregistrée à Quimper (SIMON, commun. personnelle).

En l'absence de données réelles pour calculer le bilan soufre, une analyse du rapport N/S dans les plantes serait nécessaire pour apprécier l'état de la nutrition soufrée, surtout dans les situations qui n'ont pas reçu de soufre depuis plusieurs années et dans les sols de faible épaisseur et de texture légère, caractérisés par une faible capacité de rétention. L'utilisation de ce test est préférable à d'autres (teneur

en soufre total ou en SO_4^{--} dans la plante ou dans le sol, SKINNER, 1987), car il lie la nutrition soufrée à la nutrition azotée. Par rapport à la teneur en soufre des plantes, il évite l'utilisation de seuils différents selon la nutrition azotée ou l'âge de la plante, deux facteurs qui induisent une variation importante de la teneur en azote.

Accepté pour publication le 30 juin 1988

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- BYERS M., BOLTON J. (1979) : « Effects of nitrogen and sulphur fertilizers on the yield, N and S content and amino acid composition of the grain of spring wheat », *J. Sci. Food, Agric.*, 30, 251-263.
- DIJKSHOORN W., LAMPE J.E.M., VAN BURG P.F. (1960) : « A method of diagnosing the sulphur nutrition status of herbage », *Plant and Soil*, 13, 3, 227-241.
- DIJKSHOORN W., VAN WIJK A.L. (1967) : « The sulphur requirements of plants as evidenced by the sulphur-nitrogen ratio in the organic matter. A review of published data », *Plant and Soil*, 26, 1, 129-157.
- GACHON L. (1972) : « Les pertes en soufre par drainage. Le soufre en agriculture », *Ann. agron.*, n° hors série, 11-21.
- HEBERT J. (1972) : « Le bilan du soufre et le problème de la fertilisation. Le soufre en agriculture », *Ann. agron.*, n° hors série, 388-399.
- MILLARD P., SHARP G.S., SCOTT N.M. (1987) : « Sulphur as a nutrient for plants and animals », *Soufre élémentaire in agricult.*, Nice, vol. 2, 509-515.
- RASMUSSEN P.E., RAMIG R.E., ALLMARAS R.R. and SMITH C.M. (1975) : « Nitrogen-sulphur relations in soft white winter wheat », *Agr. J.*, 67, 224-228.
- SALETTE J. (1978) : « Sulphur content in grasses during primary growth », *Symp. Sulphur in forage*, Wexford - Irlande. Sulphur Inst, 143-152.
- SKINNER R.J. (1987) : « Growth responses in grass to sulphur fertilizer », *Soufre élémentaire in agric.*, Nice, vol. 2, 525-537.
- SCHNUG E. (1987) : « Response of crop yield and quality to fertilisation with elemental sulphur in Northern Germany », *Soufre élémentaire in agric.*, Nice, vol. 2, 553-563.
- TRIBOÏ E. (1981) : « Bilans hydriques et minéraux en relation avec le système cultural », *Pb. agrofit. teor. applic.*, vol. III, 3, 229-258.
- WRIGLEY C.W., DU CROS D.L., MOSS H.J., RANDALL P.J., FULLINGTON J.G. et KASARDA D.D. (1984) : « Effect of sulphur deficiency on wheat quality », *Sulphur in agriculture*, vol. 8, 2-7.