

PEUT-ON AUGMENTER LE RENDEMENT ET LA QUALITÉ DE LA LUZERNE DANS LES SOLS CALCAIRES DES CHARENTES ?

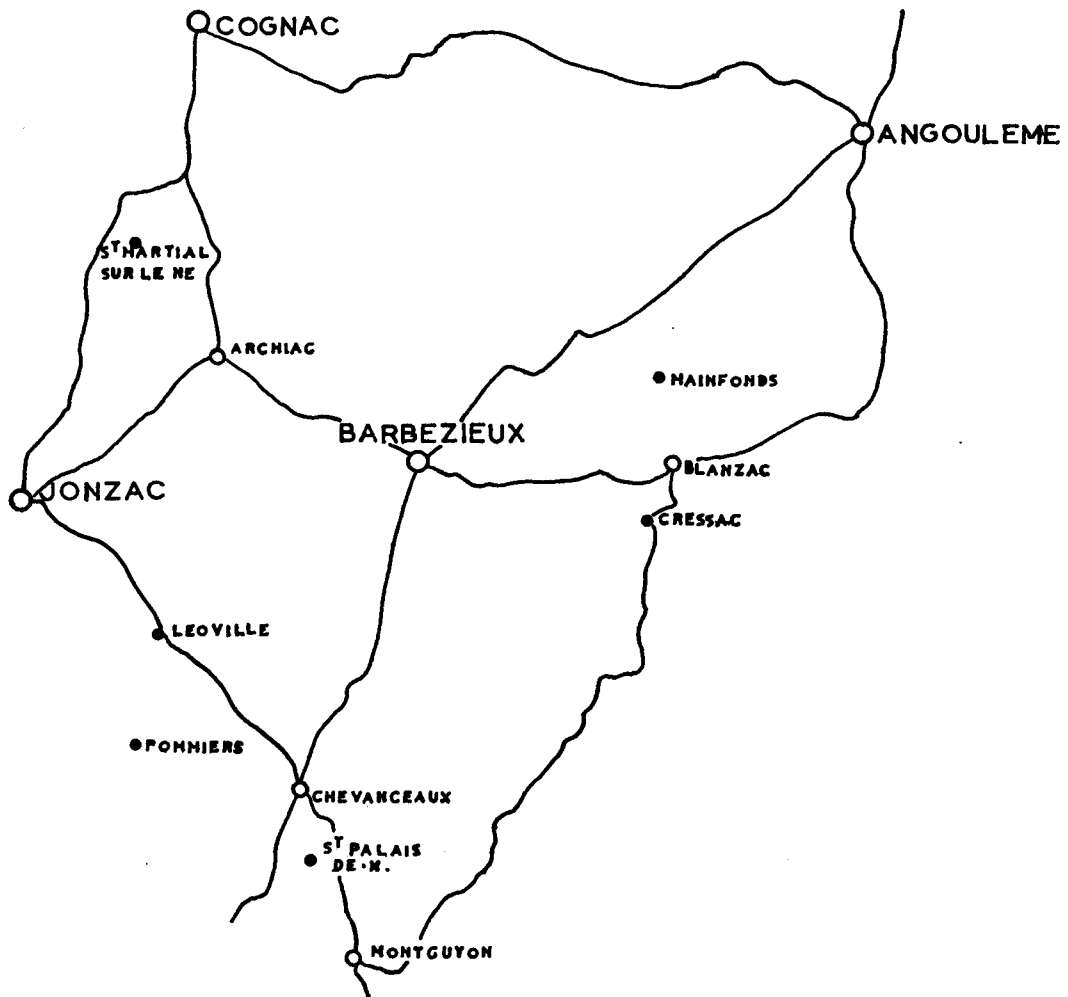
IMPORTANCE DU SOUFRE, DU MOLYBDÈNE ET DE CERTAINS AMENDEMENTS MINÉRAUX ET ORGANIQUES RICHES EN OLIGO-ÉLÉMENTS SUR LE DÉVELOPPEMENT ET LA QUALITÉ DE LA LUZERNE DANS LES SOLS ARGILO-CALCAIRES DES CHARENTES

UN EFFORT CONSIDÉRABLE EST ACTUELLEMENT RÉALISÉ POUR TENTER DE COMBLER LE DÉFICIT MONDIAL EN PROTÉINES D'ORIGINE VÉGÉTALE. EN FRANCE, CET EFFORT paraît plus particulièrement axé sur le colza, le tournesol, la féverole, le lupin et le soja. Il apparaît cependant souhaitable de ne pas oublier pour autant les sources traditionnelles de protéines que constituent certains végétaux verts comme la luzerne : le présent travail démontre effectivement que dans une région où cette plante est cultivée depuis fort longtemps, il est encore possible, en modifiant certaines propriétés du sol, de parvenir à des accroissements considérables de rendement et de qualité aboutissant en fin de compte à doubler ou à tripler la quantité de protéines produites à l'unité de surface.

Depuis plusieurs années, en effet, la culture de la luzerne se heurte à de sérieuses difficultés dans les sols calcaires des Charentes et plus particulièrement dans les rendzines grises développées sur le Campanien et appelées « Terres de Champagne » ; ce type de sol couvre une zone d'environ 100.000 hectares. Dans de tels sols, la luzerne s'implante mal ; sa croissance est réduite dès la première année ; en seconde année, la plante devient chlorotique, résiste mal aux adventices pour finalement disparaître.

La Station d'Agronomie du Centre de Recherches de Bordeaux a entrepris en 1966 de rechercher les causes du dépérissement de ces luzernières en menant une enquête auprès de certains agriculteurs concernés, dans le secteur représenté sur la carte ci-après :

*par M. Menet, J. Tauzin,
J. Delas et C. Juste.*



Si dans quelques situations il fut possible d'attribuer les difficultés de végétation à une technique défectueuse (fumure non adaptée, mauvaises méthodes d'exploitation, maladies), dans la plupart des cas cependant aucune relation n'apparut entre le dépérissement et les conditions de culture. Mais cette enquête mit en évidence la très grande efficacité du crude ammoniac, sous-produit de l'industrie dont l'application au sol permettait de prévenir tout accident de végétation.

Nous nous sommes donc attachés à rechercher les modalités d'action de ce produit, en espérant trouver ainsi les raisons du dépérissement des luzernières. Cette voie d'approche nous était également dictée par le fait qu'il fallait proposer au plus vite des produits de remplacement efficaces, car le crude ammoniac devenait de plus en plus rare et coûteux.

Les recherches ont été entreprises dans deux voies différentes :

- en conditions contrôlées, où nous avons cherché, par des séries d'essais en pots, à tester l'efficacité des différents composants du crude ammoniac ;
- en plein champ, où nous avons transposé les protocoles mis au point pour les essais en pots afin de vérifier la validité des résultats obtenus en serre.

Au cours de ces expériences, nous avons procédé à l'étude de l'influence des traitements mis en œuvre sur la qualité de la luzerne, en réalisant de nombreux dosages d'azote, de soufre, d'oligo-éléments et d'éléments majeurs.

Première partie

RAPPEL DES RÉSULTATS DES ESSAIS EN POTS

Nous ne donnerons pas ici le détail des résultats de ces essais : les lecteurs intéressés se reporteront aux publications dont les références sont indiquées plus loin.

L'analyse du crude ammoniac avait révélé que ce sous-produit de l'industrie du gaz d'éclairage était particulièrement riche en soufre et en divers oligo-éléments (fer et manganèse, notamment).

TABLEAU I
COMPOSITION DU CRUDE AMMONIAC
(par rapport au produit sec)

N %	S %	Fe %	Mn %	Cu %	Co mg/kg	Mo mg/kg
3	23	22	0,14	0,04	20	10

N.B. : La composition du crude ammoniac peut varier dans d'assez larges limites, car il s'agit d'un sous-produit.

Dans une *première série d'essais* en pots (luzerne cultivée sous serre dans un sol de rendzine provenant de la zone intéressée) (1), nous avons testé l'efficacité de chacun des éléments (soufre, fer et manganèse) contenus dans le crude ammoniac : seul le soufre a provoqué une augmentation de rendement (inférieure cependant à celle entraînée par l'addition de crude ammoniac). C'est pourquoi nous avons émis l'hypothèse d'une carence en soufre de la luzerne dans de tels sols. D'autres éléments militaient en faveur de cette hypothèse : besoins élevés de la légumineuse en soufre, généralisation de l'emploi d'engrais sans soufre, apports très réduits par les eaux de pluie du fait de l'absence de concentrations industrielle ou urbaine, faibles quantités de soufre minéral dans les sols (3).

Dans les *deuxième et troisième séries d'essais* (1), (2), (3), nous avons comparé différentes doses et types de produits contenant du soufre : dans nos conditions expérimentales, la dose optimale de soufre s'établit à 150 kg/ha, et toutes les sources se révèlent également efficaces (sulfates, superphosphate, soufre élémentaire). Comme dans la première série d'essais, le crude ammoniac donne les augmentations de rendement les plus fortes et les plus durables : on pouvait donc se demander si, en plus du soufre, le crude ammoniac ne contenait pas un autre élément indispensable à la luzerne. Des tests sommaires d'apport de molybdène à la luzerne réalisés en plein champ et en serre sur sol de rendzines ayant donné des résultats spectaculaires, nous avons mis en place *deux nouvelles séries d'essais* destinés à mesurer l'efficacité de l'apport séparé ou simultané de soufre et de molybdène (4), (5), (6). Les résultats

de ces essais furent particulièrement nets : les apports, séparés dans le temps ou dans l'espace, de soufre et de molybdène provoquent des augmentations de rendement, mais l'accroissement de production n'atteint son maximum que si l'on incorpore les deux éléments au sol (et, dans ce cas, le rendement obtenu devient comparable à celui du traitement crude ammoniac).

L'analyse des plantes soumises à ces différents traitements a permis de constater que si l'apport de molybdène seul augmentait souvent considérablement la teneur de la plante en cet élément, l'application de soufre avait tendance à l'abaisser, et par conséquent à diminuer les risques inhérents à une ingestion de fourrage trop riche en molybdène.

Au cours de l'un de ces essais, nous avons pu également constater qu'un traitement consistant en application d'un mélange commercial d'oligo-éléments à base de silicates conduisait à de substantielles augmentations de rendement au cours des premières coupes, mais que cet effet bénéfique s'atténuait sensiblement par la suite. La composition de ce produit est donnée au tableau II.

*T*ABLEAU II
COMPOSITION DU MELANGE D'OLIGO-ELEMENTS
(par rapport au produit sec)

<i>S</i> %	<i>Fe</i> %	<i>Mn</i> %	<i>Cu</i> %	<i>Co</i> mg/kg	<i>Mo</i> mg/kg
2	7	0,2	2	300	5

Deuxième partie

ESSAIS EN PLEIN CHAMP

Il était indispensable de vérifier dans les conditions de la pratique agricole la validité des résultats obtenus en conditions contrôlées : il a en effet été très souvent observé que l'efficacité des apports de soufre est très différente en serre et en plein champ.

De nombreux essais furent mis en place, en sol de rendzines des Charente et Charente-Maritime, entre 1966 et 1973, avec l'aide des organismes de développement régionaux ; l'emplacement des principaux d'entre eux est indiqué sur la carte précédente. Il n'est pas possible de décrire ici tous les essais qui ont été réalisés au cours de cette période : nous exposerons simplement ceux qui ont pu être exploités normalement pendant plusieurs années et qui ont apporté des éléments de réponse précis au problème posé.

Deux séries d'essais se sont succédé dans le temps.

A. — Comparaison de l'effet du soufre et du crude ammoniac sur l'implantation et le développement de la luzerne.

Dans ces essais, nous avons comparé l'action sur les rendements du crude ammoniac et celle d'engrais ou d'amendements minéraux contenant du soufre :

1) *Essai de Pommiers (17) :*

Cet essai a été mis en place en 1967 et comporte sept traitements répétés quatre fois, disposés en blocs. Les traitements sont les suivants :

- | | |
|------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| — 1. T | — Pas de soufre. |
| — 2. C | — Crude ammoniac 1.500 kg/ha (soit environ 300 kg/ha de soufre). |
| — 3. Se | — Soufre (sous forme de superphosphate 18 % et de sulfate de potasse) :
125 kg/ha de soufre en 1967,
110 kg/ha de soufre en 1969. |
| — 4. Se + C | — Soufre et crude ammoniac (somme des deux traitements précédents). |
| — 5. Se + bore | — Soufre (traitement 3) et bore (2 kg/ha). |
| — 6. Sp | — Plâtre : 130 kg/ha de soufre en 1967,
110 kg/ha de soufre en 1969. |
| 48 — 7. T + bore | — Pas de soufre. Bore (2 kg/ha). |

La dimension des parcelles était de 24 m², les contrôles de récolte furent effectués sur 6 m².

L'ensemble du dispositif a reçu, avant mise en place, 150 U./ha d'acide phosphorique (sous forme de scories pour les traitements 1, 2, 6 et 7, sous forme de superphosphate 18 % pour les traitements 3, 4 et 5) et 100 U./ha de potasse (chlorure pour les traitements 1, 2, 6 et 7, sulfate pour les traitements 3, 4 et 5).

En cours d'essai, des apports complémentaires d'acide phosphorique et de potasse ont été réalisés ; en 1969, un nouvel apport de soufre (110 U./ha) a été effectué, sous forme de superphosphate, de sulfate de potasse ou de plâtre, dans les traitements qui avaient déjà reçu du soufre à la mise en place de l'essai (traitements 3, 4, 5 et 6).

La luzerne fut semée en avril 1967 ; la coupe de régularisation n'a pas été pesée. Par la suite, trois coupes furent effectuées chaque année en 1968, 1969 et 1970. Les rendements (sommés des trois coupes annuelles) sont indiqués dans le tableau III.

TABLEAU III
ESSAI DE POMMIERS - RENDEMENT DE LA LUZERNE
(en kg de M.S./ha)
Somme des coupes annuelles (moyenne des 4 répétitions)

<i>Traitements</i>	<i>1968 (3 coupes)</i>	<i>1969 (3 coupes)</i>	<i>1970 (3 coupes)</i>	<i>Récolte totale</i>	<i>Indice de comparaison</i>
1 T	5.950 abc	4.453 bcd	4.755 b	15.158	100 c
2 C	9.392 e	10.181 f	12.160 d	31.733	209 e
3 Se	5.193 a	3.275 a	3.086 a	11.554	76 a
4 Se + C ..	8.368 d	9.400 e	10.838 cd	28.606	188 d
5 Se + bore	5.531 ab	3.834 ab	3.533 a	12.898	85 b
6 Sp	6.085 bc	5.050 d	5.192 bc	16.327	107 c
7 T + bore	6.463 c	4.851 cd	5.107 bc	16.421	108 c

sur luzerne en Charentes

Les valeurs qui ne sont pas suivies de la même lettre diffèrent significativement au seuil de 5 %.

Cet essai met nettement en évidence la remarquable efficacité du crude ammoniac, qui double les rendements. Les apports de soufre, par contre, sont restés sans effet. Les rendements inférieurs obtenus dans les traitements 3 (soufre des engrais) et 5 (soufre des engrais et bore) en l'absence de scories, s'expliquent peut-être par le fait qu'un oligo-élément contenu dans les scories a favorisé un meilleur développement de la luzerne dans les parcelles ayant reçu cet amendement.

Les échantillons de plante furent prélevés en 1968 et 1969, lors de chacune des coupes (partie supérieure de la luzerne, c'est-à-dire folioles et tigelles tendres). Les résultats concernant les analyses d'azote et de soufre sont indiqués dans le tableau IV (les méthodes d'analyse ont été décrites dans nos publications antérieures).

TABLEAU IV
ESSAI DE POMMIERS
TENEUR EN AZOTE ET SOUFRE DE LA LUZERNE (°/°° de la M.S.)
Moyenne des 3 coupes annuelles

<i>Traitements</i>	1968		1969	
		S	N	S
1 T	28,4 a	4,49 a	27,1 a	4,79 a
2 C	36,3 d	6,87 bcd	36,8 b	5,26 a
3 Se	26,9 a	7,92 d	28,5 a	4,58 a
4 Sp + C	34,0 c	7,01 bcd	36,5 b	5,56 a
5 Se + bore ...	26,9 a	7,91 cd	27,9 a	3,85 a
6 Sp	27,1 a	6,19 b	28,2 a	4,34 a
7 T + bore ...	27,5 a	4,05 a	27,4 a	3,26 a

Les valeurs qui ne sont pas suivies de la même lettre diffèrent significativement au seuil de 5 %.

Le crude ammoniac a nettement augmenté la teneur en azote de la luzerne ; il en résulte un accroissement considérable de sa valeur fourragère.

Action des oligo-éléments

2) *Essai de Blanzac (16)* :

Mis en place en 1968, cet essai comporte cinq traitements répétés six fois, disposés en blocs. Les traitements sont les suivants :

- 1. T — Pas de soufre.
- 2. C₁ — Crude ammoniac :
750 kg/ha en 1968 (soit 175 kg/ha de S),
750 kg/ha en 1969 (soit 175 kg/ha de S).
- 3. C₂ — Crude ammoniac :
1.500 kg/ha en 1968 (soit 350 kg/ha de S).
- 4. C₃ — Crude ammoniac :
3.000 kg/ha en 1968 (soit 700 kg/ha de S).
- 5. S — Soufre :
178 kg/ha (du sulfate de potasse et du
superphosphate 18 %).

La dimension des parcelles était de 24 m² et les contrôles de récolte furent effectués sur 6 m².

L'ensemble du dispositif a reçu avant semis 200 U./ha d'acide phosphorique (engrais complet sans soufre pour les traitements 1, 2, 3 et 4, superphosphate 18 % pour le traitement 5) et 142 U./ha de potasse (engrais complet sans soufre pour les traitements 1, 2, 3 et 4, sulfate de potasse pour le traitement 5).

En cours d'essai (1970), des apports d'entretien de potasse (100 U./ha) et d'acide phosphorique (70 U./ha) ont été effectués sous forme d'engrais ne contenant pas de soufre.

Le semis a été réalisé sous orge en 1968 ; la coupe de régularisation n'a pas été pesée. Trois coupes ont été effectuées en 1969, deux en 1970. Les résultats des pesées de récolte figurent au tableau V.

TABEAU V
ESSAI DE BLANZAC
Rendements de la luzerne
(en kg/ha de M.S. - Moyenne de 6 répétitions)

Traite- ments	1969			1970		Récolte totale	Indice de compar.
	1 ^{re} coupe	2 ^e coupe	3 ^e coupe	1 ^{re} coupe	2 ^e coupe		
1 T	3.066 a	743 a	794 a	2.750 a	1.431 a	8.794	100
2 C ₁	4.751 c	2.618 c	2.485 c	4.366 b	3.946 c	18.166	206
3 C ₂	4.988 cd	3.356 cd	2.607 c	4.180 b	4.162 cd	19.293	219
4 C ₃	5.206 d	3.491 d	2.798 c	3.930 b	4.347 d	19.772	224
5 S	3.772 b	1.218 b	1.424 b	3.930 b	2.362 b	12.706	144

sur luzerne en Charentes

Les valeurs qui ne sont pas suivies de la même lettre diffèrent significativement au seuil de 5 %.

Cette expérimentation confirme la grande efficacité du crude ammoniac sur la luzerne dans les sols de rendzines des Charentes. Mais, contrairement à ce qui s'était passé dans l'essai précédent, les apports de soufre des engrais (traitement 5) provoquent une augmentation très importante du rendement de la luzerne (144 % du témoin). Ainsi se trouve confirmée, dans les conditions de plein champ, l'hypothèse de l'existence de difficultés de l'alimentation en soufre que nous avons formulée à la suite de nos essais en conditions contrôlées.

Les résultats des analyses de plantes (parties jeune seulement, comme dans l'essai précédent) sont indiqués dans le tableau VI.

TABLEAU VI
ESSAI DE BLANZAC
Analyse de la luzerne
(en ‰ de la M.S. - Moyenne des 6 répétitions)

Traitements	1969						1970			
	1 ^{re} coupe		2 ^e coupe		3 ^e coupe		1 ^{re} coupe		2 ^e coupe	
	N	S	N	S	N	S	N	S	N	S
1 T	28,8 a	3,75	29,6 a	5,26	32,7 a	6,29	31,9	3,66	33,6	4,75
2 C ₁	35,9 b	4,86	39,9 b	6,08	38,2 c	6,75	38,2	3,90	46,9	5,34
3 C ₂	37,2 b	4,20	43,2 c	5,40	39,4 c	6,37	37,5	3,73	45,9	5,29
4 C ₃	37,0 b	4,01	46,5 d	6,17	39,6 c	5,71	41,4	4,01	46,3	5,33
5 S	28,8 a	3,80	31,4 a	5,27	35,4 b	5,89	31,0	4,58	35,7	6,88

Les valeurs qui ne sont pas suivies de la même lettre diffèrent significativement au seuil de 5 %.

N.B. : Le soufre en 1969 et 1970, l'azote en 1970 ont été déterminés dans un échantillon moyen de chaque traitement.

Le crude ammoniac accroît nettement la teneur en azote de la luzerne (donc sa valeur fourragère). En première année d'exploitation, il y a peu de différence entre les teneurs en soufre des traitements ; en seconde année, le taux de soufre est nettement accru par l'apport de soufre des engrais (traitement 5).

Les résultats obtenus dans ces deux essais et confirmés dans d'autres dispositifs non décrits ici, montrent donc que l'apport de soufre ne suffit pas à lui seul à permettre une implantation et un développement normaux de la luzerne dans les sols étudiés : tantôt le soufre est totalement inefficace (essai de Pommiers), tantôt il provoque une augmentation de rendement importante, mais toujours nettement inférieure à celle qu'entraîne l'emploi du crude ammoniac (essai de Blanzac). Tout se passe donc comme s'il fallait apporter dans ces sols, en plus du soufre, un autre élément indispensable à la luzerne ; il est vraisemblable, compte tenu des accroissements importants de teneur en azote qu'entraîne l'application du crude ammoniac, que cet élément agit au niveau de la fixation symbiotique de l'azote.

B. — Comparaison de l'effet du soufre, du crude ammoniac, du molybdène et de mélanges d'oligo-éléments sur l'implantation et le développement de la luzerne.

Diverses observations donnaient à penser que l'alimentation de la luzerne en oligo-éléments, et notamment en molybdène, était mal assurée : efficacité des scories dans l'essai de Pommiers ; efficacité d'un mélange commercial d'oligo-éléments dans des essais en pots (4), et dans des tests en plein champ ; effet très spectaculaire d'un test « molybdène » que nous avons réalisé en 1969 près de Barbezieux ; la possibilité d'une carence en molybdène de la luzerne — a priori surprenante en sol calcaire — avait été confirmée dans nos essais en pots (4), (5), (6).

C'est la raison pour laquelle nous avons mis en place plusieurs dispositifs expérimentaux destinés à étudier l'influence des apports de soufre combinés ou non à des apports d'oligo-éléments — et plus particulièrement du molybdène — sur les rendements et les teneurs en azote, soufre et molybdène de la luzerne.

1) *Essai de Cressac (Charente) :*

Mis en place en 1970 près de Cressac, cet essai comporte neuf traitements répétés quatre fois, disposés en blocs. Les traitements sont les suivants :

- | | |
|----------------------|------------------------------------------------------------------------------|
| — 1. T | — Témoin. Pas de soufre ni d'oligo-éléments. |
| — 2. C | — Crude ammoniac :
1.500 kg/ha (soit 300 kg/ha de S). |
| — 3. S | — Plâtre (300 kg/ha de S). |
| — 4. Mo 200 | — Molybdène :
200 g/ha (sous forme de molybdate d'ammonium). |
| — 5. Mo 400 | — Molybdène :
400 g/ha (sous forme de molybdate d'ammonium). |
| — 6. S + Mo 400 | — Soufre : 300 kg/ha (plâtre).
Molybdène : 400 g/ha. |
| — 7. O | — Mélange d'oligo-éléments : 800 kg/ha. |
| — 8. Fe ₁ | — Sulfate de fer : 2.500 kg/ha.
(soit 300 kg/ha de S et 500 kg/ha de Fe). |
| — 9. Fe ₂ | — Chélate de fer : 15 kg/ha d'EDDHA. |

La surface des parcelles était de 30 m², la superficie récoltée de 6 m².

L'ensemble du dispositif a reçu avant semis 200 kg/ha d'acide phosphorique et 192 kg/ha de potasse sous forme d'un engrais complet 0-28-20 sans soufre. En cours d'exploitation, toutes les parcelles ont reçu une fumure d'entretien phospho-potassique sous forme d'engrais sans soufre.

Le semis a été réalisé en mai 1970, sous avoine de printemps. Le molybdate d'ammonium a été apporté en pulvérisation sur le semis d'un mois.

La coupe de régularisation n'a fait l'objet d'aucun contrôle. Par la suite, trois coupes furent réalisées en 1971 et en 1972, deux en 1973. Les résultats des pesées de récolte sont indiqués dans le tableau VII.

TABLEAU VII
ESSAI DE CRESSAC - RENDEMENT DE LA LUZERNE
(en kg/ha de M.S. - Moyenne des 4 répétitions)

Traitements	1971			1972			1973		Récolte totale	Indice comp.
	1 ^{re} coupe	2 ^e coupe	3 ^e coupe	1 ^{re} coupe	2 ^e coupe	3 ^e coupe	1 ^{re} coupe	2 ^e coupe		
1 T	3.073 a	1.877 a	1.443 a	3.267 a	3.376 a	1.690 ab	3.978 a	1.368 ab	20.072	100
2 C	4.581 ab	2.848 bc	2.229 b	4.636 b	5.078 b	2.335 c	5.968 b	1.862 bc	29.537	147
3 S	3.453 a	1.850 a	1.503 a	2.902 a	2.954 a	1.538 a	3.401 a	1.250 a	18.851	93
4 Mo 200	4.488 bc	2.523 ab	2.437 b	4.704 b	5.529 b	2.452 c	6.484 b	1.960 c	30.577	152
5 Mo 400	5.005 c	3.189 bc	2.299 b	4.589 b	5.253 b	2.167 bc	6.105 b	1.835 bc	30.442	151
6 S + Mo 400	4.880 c	3.384 c	2.178 b	2.560 b	5.318 b	2.229 bc	6.191 b	1.873 bc	30.613	152
7 O	4.864 c	3.048 bc	2.376 b	4.428 b	5.509 b	2.253 c	6.302 b	2.021 c	30.801	153
8 Fe ₁	2.908 a	1.782 a	1.507 a	2.834 a	2.653 a	1.345 a	2.784 a	939 a	16.752	83
9 Fe ₂	3.695 ab	2.589 abc	1.673 a	3.253 a	3.756 a	1.437 a	3.731 a	1.297 a	21.431	106

Les valeurs qui ne sont pas suivies de la même lettre diffèrent significativement au seuil de 5 %.

Plusieurs traitements ont très fortement accru les rendements : le crude ammoniac, mais aussi le molybdène et le mélange d'oligo-éléments qui se sont révélés aussi efficaces que le sous-produit. L'intérêt des apports de molybdène à ces sols de rendzines, que les essais en pots laissaient prévoir, se trouve confirmé dans les conditions de plein champ. L'efficacité du

mélange d'oligo-éléments doit également être soulignée : contrairement à ce que nous avons observé en conditions contrôlées, où ce produit ne provoquait d'augmentation que pendant la première coupe, son action est ici soutenue dans le temps.

Les apports de soufre seul (traitement 3) se sont révélés, comme dans l'essai de Pommiers, inefficaces. Il en est de même des apports de fer.

Les résultats des analyses de plantes sont indiqués au tableau VIII. En 1971, nous avons relevé, comme dans les deux précédents essais, la partie supérieure de la plante seulement. Mais, à partir de 1972, l'analyse concerne la *plante entière* (jusqu'à 5-10 cm de la surface du sol).

TABLEAU VIII
ESSAI DE CRESSAC - ANALYSE DE LA LUZERNE
(moyenne annuelle, moyenne des 4 répétitions)

Traite- ments	1971			1972			1973		
	N ‰	S ‰	Mo ppm	N ‰	S ‰	Mo ppm	N ‰	S ‰	Mo ppm
1 T	32,5 a	3,53 bc	0,15 a	20,3 a	2,83 b	0,10 a	27,2 a	2,76 ab	0,08 a
2 C	43,7 c	4,35 d	—	25,3 b	2,95 bcd	0,10 a	31,3 b	2,95 bc	—
3 S	34,1 a	4,33 d	—	19,9 a	3,22 d	0,12 a	27,8 a	3,02 cd	—
4 Mo 200	42,9 c	2,99 a	6,06 b	27,0 b	2,32 a	2,35 b	32,7 b	2,66 a	1,93 b
5 Mo 400	43,0 c	3,39 b	9,66 c	26,6 b	2,27 a	3,59 c	32,1 b	2,60 a	3,91 c
6 S + Mo 400	44,2 c	3,79 c	8,02 b	26,8 b	2,45 a	3,44 c	32,0 b	2,74 ab	3,27 d
7 O	42,6 c	3,03 a	—	27,4 b	2,28 a	0,18 a	32,0 b	2,68 ab	—
8 Fe ₁	33,2 a	4,49 d	—	20,8 a	3,16 cd	0,05 a	26,1 a	3,24 d	—
9 Fe ₂	38,3 b	3,61 bc	—	21,8 a	2,91 bc	0,09 a	—	—	—

Les valeurs qui ne sont pas suivies de la même lettre diffèrent significativement au seuil de 5 %.

Les teneurs en azote de la luzerne sont fortement accrues par les apports de crude ammoniac, de molybdène (seul ou associé au soufre) et de mélange d'oligo-éléments. Le taux de soufre de la plante est légèrement augmenté par l'emploi de crude ammoniac (la première année) et de soufre (traitements 2, 3, 6 et 8). L'enrichissement du fourrage en molybdène est considérable dans le cas des traitements amenant ce produit (traitements 4, 5 et 6). L'inter-

action soufre-molybdène constatée en milieu contrôlé se manifeste également dans cet essai en plein champ, deux années sur trois : l'apport combiné de soufre et de molybdène enrichit moins la luzerne en molybdène que l'apport de cet élément effectué en l'absence de soufre.

Les modalités d'action du molybdène sur le rendement de la luzerne paraissent différentes de celles du crude ammoniac ou du mélange d'oligo-éléments : en effet, ces deux derniers traitements, bien qu'aussi efficaces que lui, ne modifient pratiquement pas la teneur en molybdène de la plante. Mais les apports de molybdène, de crude ammoniac ou de mélange d'oligo-éléments augmentent le taux d'azote de la luzerne : on peut supposer qu'ils interviennent tous au niveau de la fixation symbiotique de l'azote par la légumineuse.

2) Essai de Saint-Martial-sur-le-Né (Charente-Maritime) :

Mis en place en 1971, cet essai comporte dix traitements répétés quatre fois, disposés en blocs. Le protocole diffère du précédent sur deux points seulement : abaissement du niveau des apports de molybdène, addition d'un traitement « manganèse ». Les différents traitements sont les suivants :

- 1. T — Témoin. Pas de soufre ni d'oligo-éléments.
- 2. C — Crude ammoniac :
1.500 kg/ha (soit 300 kg/ha de S).
- 3. S — Plâtre (300 kg/ha de S).
- 4. Mo 100 — Molybdène :
100 g/ha (sous forme de molybdate d'ammonium).
- 5. Mo 200 — Molybdène :
200 g/ha (sous forme de molybdate d'ammonium).
- 6. S+Mo 200 — Soufre : 300 kg/ha de S (plâtre).
Molybdène : 200 g/ha.
- 7. O — Mélange d'oligo-éléments : 800 kg/ha.
- 8. Fe₁ — Sulfate de fer : 2.500 kg/ha
(soit 300 kg/ha de S et 500 kg/ha de Fe).
- 9. Fe₂ — Chelate de fer : 15 kg/ha d'EDDHA.
- 10. Mn — Oxyde de manganèse : 3 kg/ha.

L'ensemble du dispositif a reçu avant semis 190 kg/ha d'acide phosphorique et 135 kg/ha de potasse sous forme d'un engrais complexe 0-28-20 ne contenant pas de soufre. En cours d'exploitation, en 1973, toutes les parcelles ont reçu une fumure d'entretien phospho-potassique (150 U./ha environ) sous forme d'engrais sans soufre.

Le semis a été réalisé en avril 1971, sous orge de printemps ; le molybdène (sous forme de molybdate d'ammonium), ainsi que l'oxyde de manganèse ont été épandus par pulvérisation aussitôt après la coupe de régularisation, en janvier 1972 ; cette coupe de régularisation n'a fait l'objet d'aucun contrôle.

Trois coupes de luzerne ont été effectuées en 1972 et trois en 1973. Les résultats des pesées de récolte sont indiqués dans le tableau IX.

TABLEAU IX
ESSAI DE ST-MARTIAL-SUR-LE-NE - RENDEMENT DE LA LUZERNE
(en kg/ha de M.S. - Moyenne des 4 répétitions)

Traitements	1972			1973			Récolte totale	Indice compar.
	1 ^{re} coupe	2 ^e coupe	3 ^e coupe	1 ^{re} coupe	2 ^e coupe	3 ^e coupe		
1 T	1.569 ab	1.198 a	846 a	2.664 ab	971 ab	828 a	8.076 a	100
2 C	4.002 d	3.339 cd	2.043 d	4.994 d	3.294 c	2.415 b	20.087 e	248
3 S	2.401 c	1.700 b	1.259 b	3.537 abcd	1.484 b	1.306 a	11.687 c	144
4 Mo 100	3.898 d	3.054 c	1.860 cd	4.727 d	3.421 c	2.256 b	19.216 de	237
5 Mo 200	3.893 d	3.093 c	1.789 c	4.727 d	2.943 c	2.219 b	18.664 d	231
6 S + Mo 200 ...	4.331 d	3.693 d	2.017 cd	4.210 bcd	3.328 c	2.321 b	19.900 de	246
7 O	3.854 d	3.446 cd	1.863 cd	4.499 cd	2.977 c	2.204 b	18.843 de	233
8 Fe ₁	1.903 b	1.420 ab	914 ab	2.959 abc	1.242 ab	1.107 a	9.545 b	118
9 Fe ₂	1.162 a	1.139 a	763 a	2.263 a	926 a	797 a	7.050 a	87
10 Mn	2.143 c	1.612 b	1.092 b	2.853 abc	1.277 ab	1.190 a	10.167 b	125

Les valeurs qui ne sont pas suivies de la même lettre diffèrent significativement au seuil de 5 %.

Dans ce cas encore, d'importantes augmentations de rendement sont obtenues grâce aux apports de crude ammoniac, de molybdène (associé ou non à du
sur luzerne en Charentes 57

soufre) et du mélange d'oligo-éléments (traitements 2, 4, 5, 6 et 7). Contrairement à l'essai précédent, mais comme dans l'essai de Blanzac, le soufre seul accroît très nettement les rendements (144 % du témoin dans le cas du plâtre). L'oxyde de manganèse semble avoir exercé un léger effet positif qui demeure cependant inférieur à celui du soufre.

Il faut souligner que les quatre doses de molybdène expérimentées — 400 et 200 g/ha dans le premier essai, 200 et 100 g/ha dans le second — se révèlent toutes également efficaces : l'apport de 100 g/ha de molybdène paraît donc tout à fait suffisant dans ce type de sols.

Les résultats des analyses de luzerne (partie aérienne entière) sont donnés dans le tableau X.

TABLEAU X
ESSAI DE ST-MARTIAL-SUR-LE-NE - ANALYSE DE LA LUZERNE
(moyenne annuelle - Moyenne des 4 répétitions)
Résultats exprimés par rapport à la M.S.

Traitements	1972			1973		
	N ‰	S ‰	Mo ppm	N ‰	S ‰	Mo ppm
1 T	21,2 b	2,93 c	0,05 a	27,5 a	3,56 c	0,08 a
2 C	25,1 c	3,17 c	0,08 a	34,0 b	3,18 b	—
3 S	21,6 b	3,48 d	0,05 a	29,3 a	3,73 c	—
4 Mo 100	28,0 d	2,02 a	1,47 b	34,3 b	2,40 a	0,81 b
5 Mo 200	28,2 d	1,97 a	4,97 c	35,4 b	2,51 a	1,81 c
6 S + Mo 200	29,5 e	2,55 b	3,09 c	34,0 b	3,15 b	1,79 c
7 O	25,7 c	2,12 a	0,10 a	33,0 b	2,56 a	—
8 Fe ₁	21,6 b	3,65 d	0,04 a	27,5 a	4,08 d	—
9 Fe ₂	20,1 a	—	0,06 a	—	—	—
10 Mn	22,2 b	—	—	—	—	—

Les valeurs qui ne sont pas suivies de la même lettre diffèrent significativement au seuil de 5 %.

Ces résultats confirment pleinement ceux de l'essai précédent : accroissement des teneurs en azote par le crude ammoniac, le molybdène, le mélange d'oligo-éléments ; augmentation du taux de soufre par les apports de soufre (crude ammoniac, plâtre, sulfate de fer) ; accroissement des teneurs en molybdène par les apports de molybdène, moins sensible cependant s'il y a également apport de soufre. On peut constater également que les apports de molybdène dans ce sol où la réponse au soufre est indiscutable abaissent systématiquement la teneur en soufre de la plante, confirmant ainsi cet autre aspect de l'interaction soufre-molybdène observé en culture en pots (4), (5), (6).

L'intérêt de la dose de 100 g/ha de molybdène se trouve confirmé par ces résultats : cette dose se révèle aussi efficace sur les rendements que les

*Action des oligo-éléments
sur luzerne en Charentes*

doses 200 ou 400 g/ha mais enrichit nettement moins la luzerne en molybdène.

3) *Enrichissement de la luzerne en molybdène :*

Nous venons de voir l'influence considérable des apports de molybdène à la luzerne sur les rendements et la teneur en azote du fourrage. Mais l'on sait également que ces apports peuvent enrichir la plante en molybdène, risquant ainsi de provoquer chez les animaux ingérant le fourrage de graves accidents. C'est la raison pour laquelle nous avons procédé systématiquement à la détermination du molybdène dans les essais de Cressac (tableau III) et de Saint-Martial-sur-le-Né (tableau X), mais aussi dans d'autres dispositifs expérimentaux non décrits ici : nous avons indiqué dans le tableau XI les résultats de dosage de molybdène dans la luzerne (ensemble des parties aériennes) provenant de trois de ces essais. Dans les essais de Barbezieux et de Léoville, les apports de molybdate d'ammonium ont été effectués par pulvérisation sur la luzerne installée (plantes ayant environ 20 cm de hauteur) ; dans l'essai de Saint-Palais-de-Négrignac, l'apport a été réalisé par pulvérisation sur le sol, aussitôt après la coupe de régularisation. Dans les trois dispositifs, certaines parcelles (traitement S + Mo) ont reçu avant semis 300 kg/ha de soufre, sous forme de plâtre.

TABLEAU XI
INFLUENCE D'APPORTS DE MOLYBDENE
SUR LA TENEUR DE LA LUZERNE EN CET ELEMENT
(en mg/kg de M.S.)

<i>Traitements</i>						
<i>Essai de Barbezieux (4 répétitions)</i>						
	<i>1 coupe 71</i>	<i>2 coupe 71</i>	<i>1 coupe 72</i>	<i>2 coupe 72</i>	<i>3 coupe 72</i>	
T Témoin	0,15	0,17	0,13	0,05	0,11	
Mo 200 (200 g/ha Mo en mars 1971)	9,58	5,17	3,97	4,45	6,55	
Mo 400 (400 g/ha Mo en mars 1971)	14,80	11,50	5,36	5,65	10,43	
S + Mo 400 (400 g/ha Mo en mars 1971)	14,11	7,68	3,77	2,49	6,30	
<i>Essai de Léoville (2 répétitions)</i>						
	<i>1 coupe 71</i>	<i>2 coupe 71</i>	<i>1 coupe 72</i>	<i>2 coupe 72</i>	<i>3 coupe 72</i>	
T Témoin	0,38	0,41	0,08	0,04	0,19	
Mo 400 (400 g/ha Mo en avril 1971)	10,70	8,22	3,02		3,44	
S + Mo 400 (400 g/ha Mo en avril 1971)	14,90	5,91	2,66	0,85	4,11	
<i>Essai de St-Palais-de-Négrignac (4 répétitions)</i>						
	<i>1 coupe 72</i>	<i>2 coupe 72</i>	<i>3 coupe 72</i>	<i>1 coupe 73</i>	<i>2 coupe 73</i>	<i>3 coupe 73</i>
T Témoin	0,09	0,15	0,20	0,22	—	—
Mo 100 (100 g/ha Mo en octobre 1971)	4,08	4,44	3,94	2,54	5,20	2,24
Mo 200 (200 g/ha Mo en octobre 1971)	7,08	8,18	9,42	6,38	12,19	6,02
S + Mo 200 (200 g/ha en octobre 1971)	3,17	3,89	3,75	2,18	3,94	2,38

N.B. : Les rendements de l'essai de St-Palais-de-Négrignac ont été très faibles ; ceci explique vraisemblablement les teneurs élevées de la luzerne en Molybdène, même pour un apport de 100 g/ha (effet de concentration).

D'après les références bibliographiques dont nous disposons, le seuil de toxicité du molybdène pour les animaux est de l'ordre de 3 mg/kg de la M.S. de la ration ingérée (il est plus élevé si la teneur en cuivre de la plante augmente) (7). Bien que ce taux ne concerne que la ration et non pas la luzerne qui peut ne constituer qu'une partie de cette dernière, il paraît prudent de le considérer comme un maximum à ne pas dépasser pour l'ensemble des parties aériennes de la luzerne.

L'examen des tableaux VIII, X et XI fait apparaître que ce seuil est toujours dépassé dans le cas où la dose d'apport est de 400 g/ha de molybdène, qu'il est souvent dépassé si cette dose est de 200 g/ha, et qu'il ne l'est que rarement (cas de rendement très faible) si la dose est de 100 g/ha. En outre, et quelle que soit la quantité de molybdène utilisée, l'addition de soufre au sol se traduit toujours par un moindre enrichissement de la plante en molybdène (antagonisme soufre-molybdène) (4), (5), (6).

Il est donc indispensable, dans les conditions de la pratique agricole, de prescrire des apports de molybdène au plus égaux à 100 g/ha, et de toujours les associer à un apport de soufre. (Il nous paraît utile d'insister sur le danger que peut présenter l'utilisation de doses trop élevées d'un produit dont l'effet sur les rendements est par ailleurs très spectaculaire.)

Troisième partie

INFLUENCE DES DIFFÉRENTS PRODUITS EXPÉRIMENTÉS EN PLEIN CHAMP SUR LA TENEUR DE LA LUZERNE EN ÉLÉMENTS AUTRES QUE LE SOUFRE, L'AZOTE ET LE MOLYBDÈNE

Dans la plupart des dispositifs expérimentaux de plein champ, nous avons procédé régulièrement à la détermination des principaux éléments majeurs et mineurs de la luzerne prélevée au moment de la récolte. Dans aucun des essais, il n'a été possible de faire apparaître une incidence parti-

culière des différents traitements susceptibles d'expliquer entre autres l'effet remarquable des applications de molybdène, de soufre, de crude ammoniac ou du mélange d'oligo-éléments.

Aussi, nous sommes-nous contentés de faire figurer dans le tableau XII la composition moyenne de la luzerne récoltée en 1973 dans les essais les plus probants, en l'occurrence ceux de Cressac et de Saint-Martial-sur-le-Né.

TABLEAU XII
COMPOSITION MINERALE DE LA LUZERNE
ESSAI DE CRESSAC ET DE ST-MARTIAL-SUR-LE-NE
(Moyenne des 4 répétitions pour l'année 1973)

Traitements	Essai	P 205	K	Ca	Mg	Fe	Cu	Mn	Zn
		(kg/t de M.S.)				(g/t de M.S.)			
1 T	Cressac	6,05	17,06	21,72	2,01	60	8	23	25
	Saint-Martial	6,05	15,18	24,10	1,95	60	6	29	22
2 C	Cressac	5,49	15,26	23,94	2,27	70	5	39	24
	Saint-Martial	5,90	16,13	28,66	2,19	60	7	37	21
3 S	Cressac	6,08	17,18	24,00	2,14	90	7	24	27
	Saint-Martial	6,23	16,38	25,19	2,11	60	6	31	22
4 Mo 200	Cressac	5,79	16,09	22,86	2,11	70	7	23	25
	Mo 100	Saint-Martial	5,97	16,58	22,06	2,22	70	6	29
5 Mo 400	Cressac	5,67	15,34	23,09	2,19	70	6	24	26
	Saint-Martial	5,88	15,08	23,07	2,24	60	7	27	21
6 S + Mo 400. S + Mo 200.	Cressac	5,79	15,76	23,28	2,25	70	6	23	25
	Saint-Martial	5,66	16,00	23,57	2,30	60	8	26	22
7 O	Cressac	5,75	15,73	22,02	2,21	70	8	22	33
	Saint-Martial	5,97	14,40	21,54	2,07	70	8	29	25
8 Fe ₁	Cressac	6,31	17,22	21,88	1,97	70	6	20	23
	Saint-Martial	5,89	15,27	22,97	2,06	60	7	24	23
Moyenne générale	Cressac	5,86	16,20	22,77	2,14	71	6	24	26
	Saint-Martial	5,94	15,62	23,14	2,14	62	7	29	22

Il faut constater que le crude ammoniac augmente nettement la teneur en manganèse de la plante — teneur qui est dans certains cas presque doublée 61

— et que le mélange d'oligo-éléments a tendance à élever très légèrement le taux de zinc.

L'examen des teneurs en oligo-éléments confirme une fois de plus (8) la faible aptitude de la luzerne à concentrer certains d'entre eux comme le zinc et le manganèse dont les teneurs se situent très en deçà des seuils de carence habituellement admis pour les rations fourragères (45 mg/kg pour le zinc et le manganèse). A cet égard, le crude ammoniac constituerait un moyen de corriger cet état de choses, pour ce qui est du manganèse tout au moins.

Dans le tableau XIII, nous avons fait figurer les exportations moyennes annuelles d'une culture de luzerne conduite dans ce type de sols, où les potentialités de production maximales semblent se situer aux environs de 10 t/ha de matière sèche. Ces indications devraient permettre de définir plus rationnellement la fumure d'entretien de la luzerne.

TABLEAU XIII
EXPORTATIONS MOYENNES ANNUELLES
D'UNE CULTURE DE LUZERNE EN SOL ARGILOLOCALCAIRE
(RENDZINES) DES CHARENTES

<i>P205</i>	<i>K20</i>	<i>MgO</i>	<i>CaO</i>	<i>S</i>	<i>Fe</i>	<i>Cu</i>	<i>Mn</i>	<i>Zn</i>
		(en kg/ha)					(en g/ha)	
59	190	36	340	30	660	65	270	230

CONCLUSIONS

Dans les sols de rendzines des Charentes, où les difficultés d'implantation des luzernières et leur dépérissement constituent souvent un obstacle considérable à l'intensification fourragère, il est possible d'obtenir des rendements très satisfaisants et un fourrage de qualité en utilisant l'une des trois solutions suivantes :

- apport de crude ammoniac, dont la dose optimale est de l'ordre de 1.200 à 1.500 kg à l'hectare. Mais, du fait des modifications intervenues dans l'approvisionnement en gaz, ce sous-produit de la fabrication du gaz d'éclairage va disparaître ;
- apport d'un mélange commercial d'oligo-éléments, à la dose de 800 à 1.000 kg/ha ;
- apport de molybdène (à la dose maximale de 100 g/ha) associé à un apport de soufre (150 kg/ha) destiné à prévenir les carences en soufre constatées dans certaines situations et à diminuer les risques d'intoxication de l'animal par ingestion de luzerne trop riche en molybdène (antagonisme soufre-molybdène).

L'utilisation de l'une des trois solutions permet presque de tripler la production de matières azotées digestibles (M.A.D.) comme le démontrent clairement les résultats des dispositifs expérimentaux de Cressac et de Saint-Martial-sur-le-Né (tableau XIV).

TABLEAU XIV
INFLUENCE DES APPORTS AU SOL DE CRUDE AMMONIAC,
DE SOUFRE, DE MOLYBDENE ET D'UN MELANGE
D'OLIGO-ELEMENTS SUR LA PRODUCTION DE MATIERE AZOTEE
DIGESTIBLE

Traitements	Matière azotée digestible				Unités fourragères/ha	
	Cressac (8 coupes)		St-Martial (6 coupes)		Cressac (8 coupes)	St-Martial (6 coupes)
	kg/ha	Indice	kg/ha	Indice		
1 T	1,664	100	503	100	11.842	4.764
2 C	3.448	206	1.729	343	17.427	11.851
3 S	1.568	94	794	157	11.122	6.895
4 Mo 200 ..	3.831	230	—	—	18.041	—
100 ..	—	—	1.733	344	—	11.337
5 Mo 400 ..	3.708	222	—	—	17.962	—
200 ..	—	—	1.754	348	—	11.011
6 S+Mo 200	3.799	228	—	—	18.062	—
400 ..	—	—	1.643	326	—	11.741
7 O	3.807	228	1.551	308	18.173	11.117
8 Fe ₁	1.346	80	614	122	9.883	5.631

Bien que l'ensemble des expérimentations réalisées en milieu contrôlé ou en plein champ aient des conséquences d'ordre pratique considérables, elles n'ont pas permis pour autant d'explicitier les modalités d'action des différents produits expérimentés : le soufre intervient dans certains cas en corrigeant des carences et il doit toujours être associé au molybdène ; le crude ammoniac et le mélange d'oligo-éléments contiennent de si faibles quantités de molybdène — et modifient si peu la teneur de la luzerne en cet élément — qu'il est permis de se demander si c'est bien le molybdène qui est seul responsable des accroissements de rendement provoqués par ces deux produits.

L'examen des chiffres concernant l'action des différents traitements expérimentés sur les composants minéraux de la luzerne autres que l'azote, le soufre et le molybdène, ne permet pas non plus de formuler une hypothèse sur le ou les éléments responsables des accroissements de rendement et de qualité observés.

Il est en tout cas remarquable de constater que les trois produits efficaces agissent à la fois sur la production et la teneur en azote de la luzerne. Ce fait semble démontrer qu'ils interviennent au niveau de la fixation de l'azote : outre le molybdène, certains oligo-éléments encore non identifiés contenus dans le crude ammoniac ou le mélange d'oligo-éléments pourraient être impliqués dans ce phénomène.

REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les agriculteurs chez qui ces essais ont été effectués ainsi que les organismes de développement de Charente et Charente-Maritime et leurs conseillers qui nous ont aidé à réaliser ce travail : S.U.A.D., G.V.A., C.E.T.A.

Nous remercions également le « Sulphur Institute » de Londres pour le concours qu'il nous a apporté.

M. MENET, J. TAUZIN, J. DELAS et C. JUSTE,

*Station d'Agronomie, I.N.R.A.,
Centre de Recherches de Bordeaux,
33140 Pont de La Maye.*

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES :

- (1) DELAS J., DUTIL P., JUSTE C. et TAUZIN J. (1967) : « Carence en soufre de la luzerne en sol de Charente. - I. Résultats d'essais en serre », *C.R. Acad. Agric.*, 53, 947-956.
- (2) JUSTE C., DELAS J., TAUZIN J. et MENET M. (1969) : « Carence en soufre de la luzerne en sol de Charente. - II. Efficacité comparée de diverses sources de soufre », *C.R. Acad. Agric.*, 55, 420-424.
- (3) DELAS J., JUSTE C., TAUZIN J. et MENET M. (1970) : « Sulphur deficiency of alfalfa (*Medicago sativa*) in soils of the Charente area (South West of France) », *Proc. of Sulphur in Agriculture Symposium*, Johnstown Castle, Ireland, 51-67.
- (4) JUSTE C., DELAS J. et TAUZIN J. (1971) : « Carence en soufre de la luzerne en sol de Charente. - III. Interaction soufre-molybdène dans un essai réalisé en vases de végétation », *C.R. Acad. Agric.*, 57, 1134-1139.
- (5) DELAS J., JUSTE C. et TAUZIN J. (1972) : « Combined S and Mo deficiency observed in Charente », *Sulphur Institute Journal*, 8, 3, 14-15.
- (6) DELAS J., JUSTE C. et TAUZIN J. (1973) : « Carence en soufre de la luzerne en sol de Charente. - IV. Nouvelles observations sur l'interaction soufre-molybdène », *C.R. Acad. Agric.*, 59.
- (7) RICHET G. (1972) : « Oligo-éléments et ruminants domestiques », *Etude S.E.I.*, n° 51.
- (8) PERIGAUD S., BELLANGER J. et LAMAND M. (1972) : « Les oligo-éléments dans le foin, en France », *Fourrages*, 52, 11-37.