

Fertilisation soufrée des céréales

Mieux prévoir le risque de déficience

Diagnostiquer une déficience en soufre est possible. La prévoir avec précision suffisamment tôt pour intervenir constitue le principal axe de recherche. Une grille de décision et des indicateurs complémentaires sont disponibles. Fort de son expérience et d'un nouveau réseau soufre en partenariat avec Cerexagri, ARVALIS - Institut du végétal décrypte les enjeux de la fertilisation soufrée.

© M. Giban



L'apport systématique de soufre sur les céréales n'est pas toujours rentable. Quelques essais ont même mis en évidence des effets dépressifs dans certaines situations.

Afin d'éviter les apports systématiques dans les situations où le risque de déficience est faible, une grille de décision est disponible (tableau 1). Elle permet de déterminer l'opportunité d'un apport de soufre et, lorsque celui-ci est nécessaire, d'en moduler la dose entre 20 et 50 kg SO₃/ha. Les règles de décision sont

Les indicateurs fournis par les analyses foliaires ou du sol viennent en complément de la grille de décision.

basées sur quatre critères : le type de sol, le passé de fertilisation organique, la pluviosité

Grille de décision d'un apport de soufre sur céréales d'hiver et de printemps (cas des situations sans apports réguliers de fumier) (tab. 1)

	Pluie 1/10 au 1/03	Apport (kg SO ₃ /ha) à réaliser :	
		si apport sur le précédent > 60 kg SO ₃ /ha	si précédent sans apport de soufre
Risques élevés : sols superficiels filtrants : sols argilo-calcaires superficiels, sols sableux caillouteux, limons caillouteux superficiels	> 300 mm	40	50
	< 300 mm	20	30
Risques moyens : sols argilo-calcaires moyennement profonds, limons battants froids humides	> 500 mm	30	40
	300 à 500 mm	20	30
	< 300 mm	0	20
Risques faibles : sols profonds sains, limons argileux profonds, limons francs, sols argileux	> 500 mm	20	30
	300 à 500 mm	0	20
	< 300 mm	0	0

Première étape d'un diagnostic, cette grille s'appuie sur des critères mesurables par l'agriculteur pour orienter sa décision. Sur céréales de printemps, réduire la dose de 20 kg SO₃/ha compte tenu des besoins moins importants.

Alain Bouthier
a.bouthier@arvalisinstitutduvegetal.fr

Jean-Pierre Bonnifet
jp.bonnifet@arvalisinstitutduvegetal.fr

Yves Drieu
y.drieu@arvalisinstitutduvegetal.fr

Adeline Seguin

ARVALIS – Institut du végétal

Daniel Gatay
Cerexagri

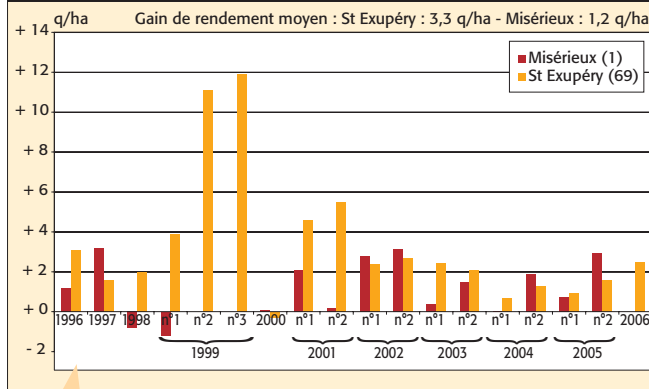
hivernale et l'apport de soufre sur le précédent.

Quatre critères pour décider

Ces quatre critères permettent d'évaluer la quantité de soufre minéral présent dans le sol sous forme de sulfate, disponible pour la culture. Celui-ci provient, d'une part, du reliquat de soufre sulfate en sortie d'hiver et, d'autre part, de la minéralisation du soufre organique au cours du printemps. Comme pour l'azote, le reliquat de soufre sulfate représente la part non lessivée issue de la minéralisation au cours de l'automne précédent, ainsi que le soufre minéral présent dans le sol, à la récolte de la culture précédente.

Le type de sol intervient à la fois par sa sensibilité aux pertes par lessivage et par la vitesse de minéralisation du soufre

Réponse de la production du blé à la fertilisation soufrée sur les sites de Misérieux (sol limoneux profond) et de Lyon-St-Exupéry (sol de graviers profond) pour la période 1996-2006 (fig. 1)



En moyenne sur dix ans, la réponse du rendement aux apports de soufre semble étroitement liée au type de sol.

qui lui est propre. Trois classes de sols ont été définies par rapport au risque de carence en soufre. Les sols superficiels filtrants à faible réserve en eau, et/ou à minéralisation faible (sables, argilo-calcaires

superficiels, craie) présentent le risque de carence le plus élevé et l'apport systématique y est préconisé en toutes régions. À l'opposé, dans les sols à risque faible (sols profonds limono-argileux ou argileux),

les apports ne sont préconisés qu'après un hiver très pluvieux (le gain de rendement dû au soufre y est rarement supérieur à 5 q/ha). Entre ces deux catégories, on identifie des sols à risque intermédiaire tels que les argilo-calcaires moyennement profonds ou les limons battants humides.

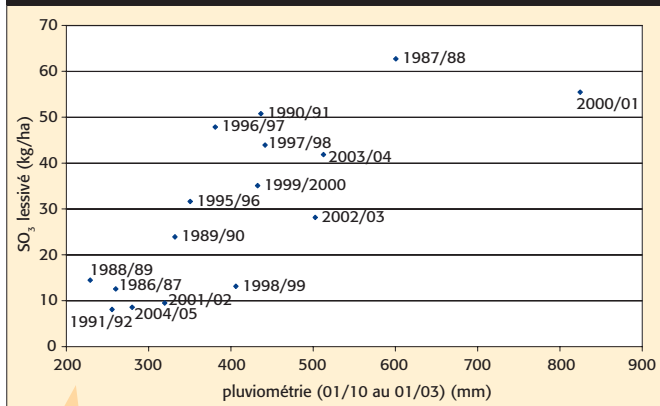
Le sol, premier facteur de raisonnement

Les expérimentations réalisées par ARVALIS - Institut du végétal depuis 10 ans sur un sol de graviers profond (sol à risque intermédiaire) dans la région Lyonnaise et sur un sol de limon profond (risque faible) à Misérieux dans l'Ain, illustrent parfaitement l'effet du type de sol sur la réponse à l'apport de soufre (figure 1).

Le passé de fertilisation organique influe sur la teneur en matière organique du sol. Des travaux danois ont montré l'ef-



Soufre lessivé selon la pluviométrie hivernale dans le dispositif lysimétrique du Magneraud (17) : moyenne annuelle des dix lysimètres avec rotation des cultures à base de colza et de blé (fig. 2)



La pluviométrie hivernale détermine l'importance du lessivage du sulfate : plus il pleut, plus il est lessivé.

fet bénéfique d'apports réguliers de fumiers de bovins sur la minéralisation du soufre du sol. On considère de ce fait que l'apport de soufre est inutile dans les parcelles recevant des apports réguliers de fumiers depuis plus de 20 ans. Les apports réguliers de lisier ne semblent pas avoir le même effet.

Les pertes par lessivage sont liées à la pluviométrie hivernale

La pluviométrie hivernale détermine l'importance du lessivage du sulfate. 20 ans de suivi, réalisé sur des terres de groies moyennes (avec 120 mm de réserve utile) en Charente-Maritime, l'ont clairement démontré (figure 2).

Pour une pluviométrie inférieure à 300 mm du 1^{er} octobre au 1^{er} mars, le lessivage a été quasiment nul alors que la totalité du stock de sulfate (de l'ordre de 60 kg SO₃/ha) était lessivée pour des pluviométries supérieures à 550 mm.

L'historique d'apport de soufre sur le précédent intervient sur le niveau des pertes de sulfate par lessivage. Ainsi dans les lysimètres du Magneraud, les quantités de soufre lessivé pour la période 1995-2005 ont été en moyenne de :

- 56 kg SO₃/ha après le maïs irrigué qui recevait 40 à 70 kg

SO₃/ha avec l'eau d'irrigation (qui contient 30 mg/l de SO₄),

- 35 kg SO₃/ha après colza qui recevait 70 kg SO₃/ha,
- 24 kg SO₃/ha après blé qui recevait 40 kg SO₃/ha.

Le niveau des pertes de sulfate observé après un blé ayant reçu en 2002 des doses croissantes de soufre montre aussi l'effet de la dose apportée sur le précédent, sur le lessivage du sulfate (figure 3).

À ces quatre critères, il faudrait ajouter la prise en compte des apports atmosphériques de soufre, provenant d'activités émettrices de soufre dans l'atmosphère (raffineries, centrales thermiques, combustions diverses...) qui varient fortement dans l'espace (de moins de 5 kg SO₃/ha à plus de 40 kg).

Le peu de données disponibles concernant ces retombées ne permet pas de dresser une carte précise pour la France. Toutefois, les cartes disponibles à l'échelle européenne permettent d'identifier certaines régions situées sous les vents dominants d'activités émettrices où les retombées de soufre sont importantes, comme la Seine-Maritime et le pourtour de l'étang de Berre par exemple. Ces observations sont cohérentes avec le constat de très faible réponse des cultures au

soufre dans ces régions.

Les outils disponibles pour compléter la grille

Des indicateurs basés sur des analyses de terre ou de plantes permettent de pronostiquer ou diagnostiquer un risque de déficience en soufre. Certains sont disponibles depuis plus de 20 ans et sont relativement bien référencés, comme le diagnostic foliaire à la floraison ou la mesure du soufre dans le sol, extrait selon la méthode Scott. La méthode Nutricheck® et le test malate sulfate sont proposés depuis le début des années 2000. D'autres, comme le GPN® soufre sont en cours de mise au point.

Les valeurs sûres

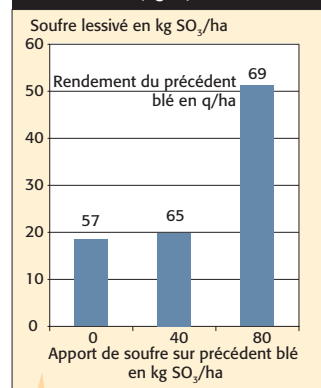
Le diagnostic foliaire est basé sur la mesure en laboratoire de la teneur en soufre des feuilles n°2 et 3, en partant de l'épi, prélevées sur 30 plantes au stade floraison. Le coût de l'analyse d'un échantillon est d'environ 25 € HT. Cet indicateur apparaît comme l'indicateur le plus apte à détecter une déficience, mais on ne peut pas l'utiliser pour intervenir sur la culture en cours car cette mesure est trop tardive. Néanmoins, si elle est répétée au cours de deux ou trois campagnes, cette mesure permet de cerner le risque de carence dans la parcelle. Le seuil de risque de déficience en soufre est de 0,20 % S dans la matière sèche.

La mesure du soufre extrait par la méthode Scott permet d'évaluer la quantité de soufre dans le sol disponible à court terme pour la culture (sulfate soluble et adsorbé). Elle peut être réalisée en fin d'hiver à partir d'un prélèvement de terre dans les horizons 0-30 cm et 30-60 cm ou dans l'horizon labouré seul pour les sols caillouteux. Le risque de carence en soufre est pronostiqué pour un stock inférieur à 60 kg SO₃/ha sur 60 cm de profondeur dans le premier cas, et pour une teneur infé-

rieure à 15 mg SO₃/kg dans le second. Cette méthode apparaît un peu moins performante que la précédente pour identifier les situations à risque. Elle est proposée par un seul laboratoire (SAS) pour un coût de 14 € HT par échantillon.

Le soufre sous forme sulfate dans le sol peut être dosé dans les parcelles où une mesure du reliquat d'azote minéral est réalisée. Cet autre indicateur sol est à l'étude car peu réfé-

Lessivage de soufre au cours de l'hiver 2002-2003 et dose de soufre apportée sur le précédent blé 2002 (fig. 3)



Le lessivage du sulfate est également influencé par les apports de soufre du précédent.



Les ventes d'engrais azotés et soufrés (sulfate d'ammonium, solutions azotées soufrées, ammonitrates soufrés, sulfonitrates) augmentent au détriment des engrais NPK. Cela traduit une évolution des pratiques de fertilisation soufrée vers plus de raisonnement.

rencé jusque-là. Il a l'avantage d'être moins cher que le dosage Scott, sachant que les deux éléments (azote et sulfate) sont dosés dans le même extrait. La pertinence de cette mesure en tant qu'indicateur de risque de déficience en soufre a, cependant, été peu étudiée.

Mis au point récemment

Le dosage du sulfate dans le jus de base de tiges au stade 2 nœuds est développé par Challenge Agriculture depuis le début des années 2000 dans le cadre de la méthode Nutricheck®. Un premier apport de soufre fin tallage est géré selon une grille très proche de celle proposée par ARVALIS - Institut du végétal. Une mesure de la teneur en sulfate dans le jus de base de tige à 2 nœuds permet de décider d'un éventuel ajustement à ce stade. Une prestation de

mise en œuvre de cette méthode est proposée par quelques organismes, dans les mêmes conditions que la méthode Jubil®. L'indicateur, testé en 1995, 1996, 2001 et 2002 sur des essais ARVALIS - Institut du végétal, a permis une discrimination satisfaisante des situations déficientes. Le seuil en dessous duquel un risque de déficience est à craindre serait compris entre 150 et

▶ Les résultats du réseau montrent, dans le contexte 2006, avec une dégradation tardive (au stade 2 nœuds) de l'alimentation soufrée, la nécessité d'appréhender le statut soufré de la culture à plusieurs stades pour réaliser un diagnostic pertinent et assurer une fertilisation soufrée en conséquence.

250 mg SO₄/l, mais les références disponibles ne permettent pas de le caler précisément.

Le test malate sulfate, proposé en routine (coût de l'analyse: 20 € HT) depuis 2002 par le laboratoire anglais de Hill Farm Court Research, est largement développé en Angleterre sur colza et céréales. Le test est basé sur la relation étroite entre l'anion organique malate et le sulfate, présents dans les tissus foliaires. Le test est réalisé sur un échantillon d'une trentaine de feuilles (plus jeune feuille ligulée), et peut être interprété sur la base du même seuil diagnostique du tallage à la fin de la montaison. Des seuils d'interprétation établis à partir de nombreux essais anglais, sont proposés pour le blé, l'orge et le colza. C'est le seul indicateur sur plante permettant un diagnostic à un stade suffisamment précoce pour intervenir si nécessaire.

Le GPN[®] soufre est en cours de mise au point par la société

Le lessivage du sulfate, forme minérale du soufre, a été suivi depuis 20 ans sur la station du Magneraud (Charente-Maritime) grâce à des cases lysimétriques.

Grande Paroisse et Cerexagri. Sa mise en œuvre serait analogue à celle du GPN[®] azote: un étalon surfertilisé en soufre (apport de 60 kg SO₃/ha sur quelques mètres carrés) doit être mis en place fin tallage. La mesure réalisée à partir du stade 2 nœuds permettrait de faire un ajustement.

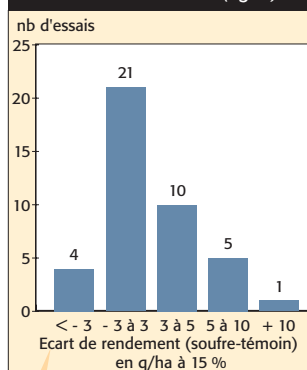
Ces différents indicateurs restent surtout des outils de techniciens et peuvent être mis en œuvre dans le cadre de réseaux de parcelles « observatoires » pour adapter le conseil en cours de campagne en complément de la grille de décision.

Un réseau observatoire en 2006

ARVALIS - Institut du végétal et la société Cerexagri, avec une vingtaine de partenaires (chambres d'agriculture, coopératives, négoce, organismes de développement, l'INRA et le laboratoire SAS-Agrosystèmes) ont mis en place 41 essais de fertilisation soufrée sur blé tendre et blé dur en 2006. Les objectifs étaient nombreux:

- mieux cerner la réponse au soufre de ces cultures à

Distribution des écarts de rendement lié à l'apport de soufre dans les essais soufre de 2006 (fig. 4)



Les conditions climatiques 2006 ont limité l'effet des apports de soufre sur le rendement.

ajustée selon la grille ARVALIS - Institut du végétal) réalisé fin tallage sous forme de soufre micronisé (apporté par le produit commercial Cerethiol[®]), engrais liquide CE contenant 1,75 kg SO₃/l sous forme de soufre élémentaire, et 0,03 kg N/l).

Les apports de soufre ont-ils influencé le rendement ?

Globalement, l'effet de la fertilisation soufrée sur la production s'est révélé de faible ampleur puisque dans seulement six essais le gain de rendement a été supérieur à 5 q/ha (figure 4). Ces résultats semblent cependant cohérents au regard de la faible pluviosité hivernale. Les plus fortes réponses ont été observées sur des sols à risque: sol sur craie, argilo-calcaire superficiel et sol sablo-limoneux superficiel. Cependant, un gain de rendement a été observé sur un sol de limon qui avait reçu des apports réguliers de lisier de porc. Par ailleurs, dans deux essais, une baisse significative du rendement avec l'apport de soufre a été enregistrée. La montée de talles consécutives à l'apport de soufre a induit un décalage de stade et une plus forte compétition du peuplement face à la sécheresse et aux fortes températures de juin, qui s'est répercutée par une baisse plus importante du poids de 1000 grains.

Une déficience en soufre après 2 nœuds en 2006

L'effectif important d'essais sans réponse significative à l'apport de soufre, ne permet pas une évaluation précise des indicateurs.

Toutefois, les diagnostics réalisés à différentes époques de la campagne à partir des différents indicateurs ont révélé une déficience temporaire en soufre qui s'est manifestée seulement à partir du stade 2 nœuds dans de nombreuses situations.

En début de campagne, la plupart des parcelles présen-



© J.P. Bonniét - ARVALIS-Institut du végétal

taient une teneur en soufre Scott suffisante. Au stade épi à 1 cm, le test malate sulfate confirmait cette tendance (26 parcelles sur 35 analysées). Ce pronostic était alors cohérent avec la pluviosité hivernale.

Ensuite, les mesures réalisées au stade 2 nœuds avec trois indicateurs (test malate-sulfate, Nutricheck® et GPN®) ont diagnostiqué une déficience en soufre pour la moitié des parcelles. Cette déficience observée à ce stade peut s'expliquer par les températures de début montaison trop froides pour engendrer une minéralisation suffisante de soufre. D'autre part, les fortes pluies du mois de mars ont pu induire du lessivage dans certains sols.

À la floraison, le diagnostic foliaire a révélé que la carence observée à 2 nœuds s'est estompée (9 parcelles sur 29 diagnostiquées sont en carence) ou est limitée par d'autres fac-

teurs (sécheresse).

Cette déficience a été de courte durée sur certaines parcelles, et a eu peu d'effet sur la croissance sans conséquence sur la production de grain.

Pour quelques parcelles, l'apport de soufre réalisé fin tallage a pu être en partie lessivé par les pluies de mars, et n'a pas permis une correction suffisante de la déficience. En effet, les indicateurs mesurés au stade 2 nœuds sur le traitement avec apport de soufre fin tallage ont révélé une déficience consécutive à une mauvaise efficacité de cet apport. Il se peut donc que dans certains cas, on ait sous-estimé la réponse au soufre dans la mesure où l'apport réalisé fin tallage, n'a pas eu l'efficacité escomptée, pour limiter la déficience.

Par ailleurs, une carence azotée sévère à 2 nœuds (révélée par une teneur en nitrate dans le jus de base de tige très faible) a sans doute limité la

réponse au soufre sur quatre parcelles.

Enfin, la sécheresse de fin de cycle a pu également limiter l'expression de la réponse au soufre, voire induire dans quelques situations, des effets négatifs de l'apport de soufre.

Les résultats de ce réseau montrent ainsi dans le contexte 2006, avec une dégradation tardive (au stade 2 nœuds) de l'alimentation soufrée, la nécessité d'appréhender le statut soufré de la culture à plusieurs stades pour réaliser un diagnostic pertinent et assurer une fertilisation soufrée en conséquence.

Ce réseau va être reconduit en 2007, pour disposer de résultats dans une gamme climatique plus variée. ■

Remerciements

Les 41 essais ont été mis en place par les organismes suivants : Chambre d'Agriculture d'Ile-de-France, Chambre d'Agriculture 76, Chambre d'Agriculture 80, Chambre d'Agriculture 45, Grainor, SC2, Cultivances, Cavac, CETA Romilly, Noriap, CAPL (49), MCA, Soufflet Atlantique, Charente Coop, INRA Le Rheu. Les partenaires ont mis en place les essais et réalisés les prélèvements pour analyses. ARVALIS - Institut du végétal et Cerexagri ont également mis en place des essais, assuré l'organisation du réseau, la réalisation ou la prise en charge des analyses de sols et de plante, et réalisé la synthèse des résultats. Le laboratoire SAS-Agrosystèmes a pris en charge les mesures de soufre Scott et de soufre sulfate. Que tous ces organismes soient ici remerciés pour leur contribution.