

Après l'azote, le potassium et le phosphore, le soufre est le 4^e élément fertilisant le plus prélevé par les céréales. Avec des retombées atmosphériques en soufre moindres depuis 30 ans, la fertilisation soufrée est devenue indispensable dans la majorité des situations. Un outil de pilotage, le **NUTRICHEK®** **SOUFRE a été testé.**

Fertilisation des céréales

Tout savoir sur les enjeux du soufre

Les céréales absorbent entre 50 et 70 kg SO₃/ha

Contrairement aux crucifères (comme le colza), le blé tendre, comme l'ensemble des céréales, est considéré comme une espèce dont les besoins en soufre sont modérés. Pour produire 80 q/ha, un blé mobilise de l'ordre de 60 kg SO₃/ha alors qu'un colza en absorbe plus de 150 kg pour produire 40 q/ha.

La cinétique d'absorption du soufre au cours du cycle de développement du blé est analogue à celle de l'azote. L'essentiel du prélèvement de soufre a donc lieu pendant la montaison. Le soufre disponible dans le sol suffit généralement à assurer les faibles besoins de la culture jusqu'au stade épi 1 cm.

Une dynamique dans le sol proche de celle de l'azote

Comme l'azote, le soufre est présent dans le sol essentiellement sous forme organique. Il est donc soumis aux processus de minéralisation. Comme pour l'azote, la teneur en soufre total du sol n'est pas un



C'est surtout à partir du début de la montaison que la déficience en soufre peut apparaître.

indicateur de sa disponibilité pour les cultures.

En conditions de sol aéré, la minéralisation du soufre organique aboutit à la forme sulfatée, très sensible au lessivage. Toutefois, le lessivage du sulfatée des terres agricoles ne constitue pas actuellement un risque pour l'environnement (encadré 2). Notons que, comme pour les nitrates, les

Attention aux unités employées

Selon la réglementation française pour l'étiquetage des engrais, leur teneur en soufre doit être exprimée en SO₃, alors que cette forme n'existe pas dans les engrais. Dans la plupart des autres pays, elle est exprimée en S. Par ailleurs, les résultats des dosages analytiques du soufre dans les végétaux sont le plus souvent exprimés en S.

Des confusions ou interprétations erronées de données peuvent en découler. Le coefficient de conversion de l'élément S en SO₃ est de 2,5.

pertes de sulfates et le drainage hivernal sont étroitement liés (figure 1). Une partie du sulfate se trouve également adsorbée sur certains constituants du sol : oxydes, matières organiques... Il peut constituer une réserve de soufre disponible à court terme pour les cultures.

Des méthodes analytiques ont été mises au point pour mesu-

Alain Bouthier

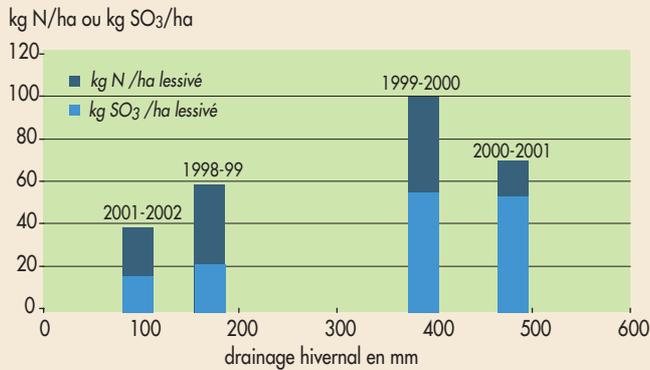
abouthier@itcf.fr

**ARVALIS —
Institut du végétal***

*L'ITCF et l'AGPM-TECHNIQUE ont fusionné le 18 décembre 2002 pour créer ARVALIS-Institut du végétal

La quantité de soufre lessivé sous forme sulfate, comme celle d'azote nitrique, varie selon l'importance de la lame drainante.

Pertes en azote nitrique et en sulfate mesurées à 1 mètre de profondeur sous blé tendre en terres de groies (lysismètres du Magneraud, période 1998-2002) (figure 1)



rer le soufre disponible à l'échelle de la culture, en vue d'en faire un outil de prédiction du risque de carence en soufre. Ces méthodes extraient du soufre sous forme sulfate (adsorbé et dans la solution du sol) ainsi que du soufre organique rapidement minéralisable (esters). Les essais montrent que l'une de ces méthodes (méthode Scott) permet de détecter de manière assez satisfaisante les situations à risque de carence (figure 2).

Beaucoup moins d'apports atmosphériques de soufre depuis 30 ans

Les retombées atmosphériques de soufre proviennent de l'activité industrielle et du chauffage domestique. Cette source d'apport permettait, jusque dans les années 70, de satisfaire les besoins des cultures. L'épuration des fumées imposée depuis 30 ans a permis d'abaisser progressivement les émissions de soufre dans l'atmosphère à un niveau moyen

inférieur à 20 kg SO₃/ha en France. Celles-ci devraient encore baisser dans les années à venir. Le bilan du soufre dans les parcelles cultivées est donc devenu déficitaire dans toutes les situations qui ne reçoivent pas régulièrement des apports sous forme minérale ou organique. Suite à ce bilan déficitaire, le risque de déficience en soufre sur céréales va progressivement se généraliser dans un délai assez court mais difficile à estimer en l'absence de dispositifs de suivi du soufre dans les sols et les cultures.

L'ITCF a conduit, au cours des campagnes 2000-2001 et 2001-2002, quinze essais de fertilisation soufrée sur blé. Un des objectifs était d'évaluer la réponse à cette fertilisation sur des sols considérés jusqu'alors à faible risque de déficience en soufre. Très différentes pour les deux campagnes, ces réponses étaient étroitement dépendantes de la pluviosité hivernale.

Ainsi, l'abondance des pluies en 2000-2001 explique la réponse significative à un apport de soufre (fin tallage) observée dans six essais sur neuf. Une réponse a même été observée sur une parcelle de limon en Bretagne avec une teneur en matière organique élevée, recevant régulièrement des apports de déjections animales. Le gain de rendement moyen dans ces six essais était de 7 q/ha.

L'hiver 2001-2002 fut, au contraire, plutôt sec dans de nombreuses régions et aucune réponse au soufre n'a été enregistrée dans les sols profonds. En 2001, la comparaison entre l'apport de soufre fin tallage (stade conseillé) et au stade 2 nœuds a confirmé la plus grande efficacité de l'apport fin tallage. L'apport à 2 nœuds, bien qu'efficace, est trop tardif pour corriger au mieux la défi-

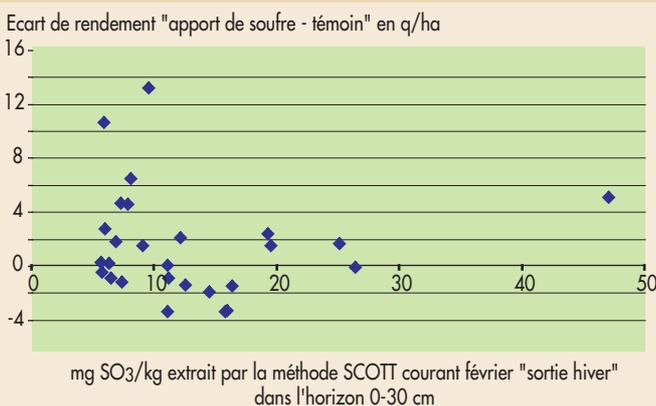
Quel impact environnemental de la teneur en sulfate de l'eau ?

L'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) n'a pas fixé de niveau guide pour la teneur en sulfate de l'eau potable. Mais, en raison des irritations gastro-intestinales possibles, elle recommande une déclaration de cette teneur au-dessus de 500 mg SO₄/l. Une teneur élevée en sulfate peut aussi modifier le goût de l'eau. La réglementation de l'Union Européenne a fixé un niveau guide de 250 mg SO₄/l. Dans certains états canadiens (Colombie Britannique), la teneur seuil des eaux brutes a été fixée à 100 mg SO₄/l car trop de sulfate induirait la précipitation du fer. Ceci entraînerait une carence en fer préjudiciable à la vie aquatique.

A côté de ces chiffres, la concentration maximale observée dans les eaux drainage des essais du Magneraud (17) s'élève seulement à 30 mg SO₄/l à 1 m de profondeur. Pourtant, le sous-sol est filtrant et la culture de blé succédait à un colza ayant reçu un apport de 70 kg SO₃/ha.

La réponse à un apport de 40 kg SO₃/ha est plus marquée lorsque la teneur en soufre du sol est inférieure à 10 mg SO₃/kg.

Teneur en soufre du sol à la sortie de l'hiver extraite par la méthode SCOTT (essais ARVALIS-Institut du végétal 2000-2002 et essais CRITTHYGINOV CENTRE 1996-1997) (figure 2)



cience. Dans trois essais sur six avec réponse au soufre, l'écart de rendement moyen en faveur de l'apport fin tallage a été de + 3,6 q/ha. Ceci signifie que dans certains cas (hivers très pluvieux, sols très filtrants...), la carence se manifeste dès la fin du tallage. Si elle n'est pas rapidement corrigée, elle engendre une régression des talles affectant le potentiel de production de la culture. Toutefois, en 2001, la fertilisation soufrée a révélé un effet ↗

↳ négatif sur le rendement du blé dans un essai. Ce phénomène peut être dû, soit à une carence latente en cuivre, induite ou aggravée par l'apport de soufre, soit à une interaction entre la fertilisation soufrée et les conditions climatiques en fin de cycle. Ceci montre que la fertilisation soufrée des céréales ne doit pas être réalisée de manière systématique. Au contraire, elle doit être gérée en fonction d'un risque défini à l'échelle de la parcelle.

Premier objectif: le rendement

En 2000-2001, la fertilisation soufrée n'a affecté la qualité des grains que lorsqu'elle a influencé favorablement le rendement (tableau 1).

Le paramètre P/L (rapport ténacité sur extensibilité) ainsi que le W sont le plus souvent affectés alors que la note de panification et la teneur en protéines sont influencées de façon plutôt aléatoire. La diminution du P/L peut être un avantage ou un inconvénient selon que le niveau d'extensibilité propre à la variété est trop élevé ou trop bas.

Autrement dit, lorsque l'apport de soufre ne se justifie pas pour le rendement, il ne se justifie pas non plus pour la qualité.

Une grille de décision basée sur le type du sol et la pluviosité hivernale

La décision d'apport de soufre sur céréales est ainsi basée sur l'estimation d'un risque qui prend en compte le type de sol et la pluviosité hivernale (tableau 2).

Le critère « type de sol » se décline en trois classes, en fonction de l'estimation :

- du stock de soufre organique du sol (lié à la quantité de matière organique),
- des facteurs agissant sur sa minéralisation (% argile et de calcaire, aptitude au réchauffement au printemps)
- et du risque de lessivage du sulfate (sols filtrants et/ou faible réserve utile d'eau).

La pluviosité hivernale du lieu, associée aux caractéristiques du sol, permet également d'évaluer le risque de lessivage du sulfate.

En l'état actuel des connaissances, il est difficile de prendre en compte d'autres facteurs. Toutefois, la rotation pourrait intervenir. D'une part, il semble qu'un apport important de soufre sur un précédent tel que le colza augmente la quantité de soufre minéral en sortie d'hiver, surtout en sol profond avec un hiver peu pluvieux. D'autre part, les 2^e blés sont plus sensibles à la carence en soufre.



Hivers pluvieux et sols filtrants sont deux facteurs favorables à une carence en soufre.

Un nouvel outil de diagnostic à la parcelle

La société CHALLENGE AGRICULTURE a mis au point une méthode de pilotage de la fertilisation soufrée, la méthode NUTRICHECK® SOUFRE.

Cette méthode s'appuie sur :

- une grille de prédiction du risque selon le type de sol et un conseil d'apport fin tallage de 0 à 40 unités selon le type de céréale,

- une mesure de la teneur en sulfate dans le jus de base de tiges au stade 2 nœuds. Elle permet d'évaluer l'état de nutrition en soufre des plantes. Il est alors possible de détecter les situations où le risque aurait été sous estimé ou bien celles où l'apport tallage aurait été moins efficace que prévu, en vue de réaliser un apport de rattrapage.

L'ITCF a évalué, sur cinq

essais en 2001 et six en 2002, la fiabilité de la mesure de la teneur en sulfate dans le jus de base de tiges et sa pertinence comme outil de diagnostic. Réalisées aux stades 1 et 2 nœuds, avec un apport ou non de 40 kg SO₃/ha au tallage, ces mesures semblent dépendre du stade de développement des plantes. En effet, dans les témoins sans soufre, la teneur a baissé en moyenne de 40 mg SO₄/l entre les stades 1 nœud et 2 nœuds. Pour interpréter la valeur d'une mesure, par rapport au seuil diagnostique établi (250 mg SO₄/l), il importe donc de bien la réaliser au stade préconisé.

Par ailleurs, cette mesure s'est avérée sensible à l'apport de soufre au tallage. L'écart observé entre le témoin et le traitement était en moyenne de 150 mg SO₄/l.

Un apport de 40 kg SO₃/ha n'intervient sur les paramètres qualitatifs que s'il intervient sur le rendement (tableau 1)

Site	Variété	Ecart de rendement (soufre — témoin) q/ha	Ecart de teneur en protéines (soufre - témoin) %	Ecart de W (soufre - témoin)	Ecart de P/L (soufre - témoin)	Ecart de note de panification (soufre - témoin)	Ecart de volume de pâte (soufre - témoin)	Ecart d'hydratation 14 % (soufre - témoin)
Misérieux (01)	Aztec	2,1	0,3	-18	0,23	3	63	0,1
St-Hilaire en Woivre (55)	Shango	-1,4	0,1	11	0,27	4	-17	0,2
Bergerac (24)	Galibier	6,2	0	39	-1,11	-14	50	-0,5
Labergement (21)	Isengrain	4,5	-0,4	15	-0,07	-13	-82	0,1
Satolas (69)	Aztec	4,6	-0,5	15	-0,62	10	147	0,3

Les essais qui extériorisent des effets soufre sur certains paramètres technologiques : W, P/L (Thizay, Bergerac, Satolas), montrent aussi un gain de rendement.

De plus, la teneur en sulfate dans le jus de base de tiges au stade 2 nœuds semble étroitement liée à la teneur en soufre des feuilles F2 et F3 prélevées à la floraison. Cet indicateur de l'état de nutrition sulfurée est le plus pertinent, mais trop tardif pour permettre un pilotage de la fertilisation sulfurée. Mais au seuil de carence établi de 0,2 % de soufre présent dans les feuilles n°2 et n°3 (en comptant à partir de l'épi) à la floraison correspondrait un seuil de diagnostic au stade 2 nœuds (aux environs de 200 à 250 mg/l de sulfate) (figure 3). Enfin, ce type de diagnostic permet de discriminer de façon assez satisfaisante les situations avec et sans réponse du rendement du blé à l'apport de soufre (figure 4). Toutefois, le faible nombre d'essais ne permet pas de se prononcer sur la modulation du seuil selon le type de variété (BAU, BPS, ...)

Engrais sulfurés : un large choix

Les engrais sulfurés disponibles sur le marché contiennent le plus souvent du soufre sous forme sulfate, associé à un ou plusieurs autres éléments tels que l'azote, le phosphore, le potassium ou le magnésium. On trouve également du soufre élémentaire micronisé et la forme thiosulfate. Ces trois formes ont des efficacités voisines. Toutefois, les deux dernières impliquent une mise à disposition du soufre légèrement différée puisqu'elles ne sont pas absorbables directement par les cultures ; une transformation en sulfate par voie microbienne s'impose. Pour choisir son engrais sulfuré, la forme de soufre utilisée n'est pas prioritaire. Ce choix doit être davantage déterminé par l'élément associé au soufre et par le prix de l'unité de soufre.

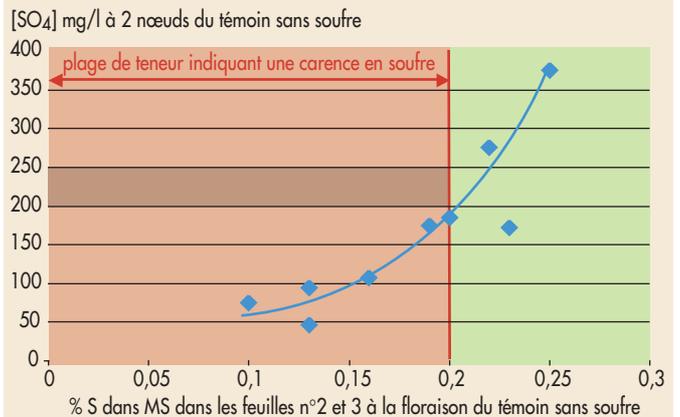
Le soufre micronisé est généralement le plus coûteux. Les superphosphates 18 et 25 et le sulfate d'ammonium, les moins coûteux, sont les plus utilisés. Les sulfates de potassium et de magnésium ainsi que les superphosphates impliquent un passage spécifique à un stade de la culture où l'apport des éléments associés au soufre est peu efficace, voire non justifié compte-tenu des exigences faibles en P, K et Mg du blé.

L'idéal est de coupler l'apport de soufre à celui de l'azote car les besoins en ces deux éléments sont étroitement liés. Le sulfate d'ammonium utilisé au premier apport d'azote constitue une pratique courante. Mais il peut se révéler peu efficace dans les sols sensibles au lessivage lorsque le printemps est pluvieux (lessivage du sulfate).

Dans certaines régions, le sulfate d'ammonium est apporté courant tallage entre le premier et le second apport d'azote. Outre le passage supplémentaire qu'il occasionne, cet apport augmente inutilement la dose d'azote au tallage ; l'objectif étant au contraire de l'alléger au profit des apports de fin montaison.

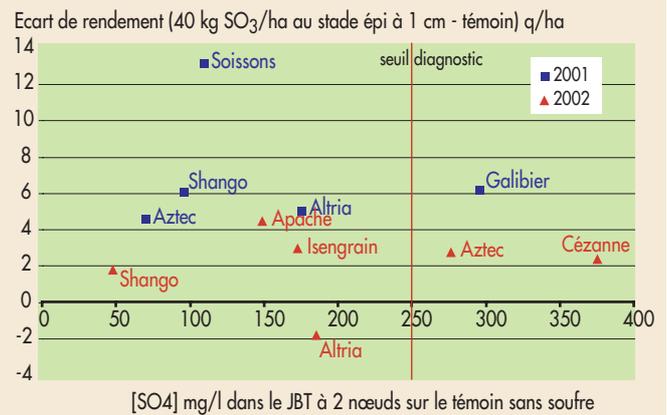
Le meilleur compromis reste donc l'apport au stade épi 1 cm d'un engrais dont le rapport N/SO₃ est compris entre 2 et 3. ■

Teneur en sulfate dans le jus de base de tige mesurée par le NUTRICHEK® au stade 2 nœuds et teneur en soufre dans les feuilles 2 et 3 à la floraison (essais en 2001 et 2002) (figure 3)



La mesure du soufre dans le jus de base des tiges au stade 2 nœuds est cohérente avec celle effectuée sur les feuilles n°2 et 3 à la floraison.

Teneur en sulfate dans le jus de base de tige mesurée par le NUTRICHEK® au stade 2 nœuds et réponse à la fertilisation sulfurée sur essais en 2001 et 2002 (figure 4)



Les plus fortes réponses au soufre mesurées correspondent à une teneur en sulfate dans le jus de base de tiges au stade 2 nœuds inférieure à 200-250 mg/l (sauf une situation avec la variété Galibier).

Grille de préconisation soufre ARVALIS-Institut du végétal sur blé tendre et orge d'hiver (kg SO₃/ha) (tableau 2)

	Pluviométrie 1/10 au 1/03	Précédent colza ou autres avec apport soufre > 60 kg SO ₃ /ha	Autres situations
Risque élevé, sols superficiels filtrants : argilocalcaire superficiel ; sol sableux ; limon caillouteux à silex	> 250 mm	40	40
	< 250 mm	20	30
Risque moyen : argilocalcaire profond ; limon battant froid hydromorphe	> 400 mm	30	40
	250 à 400 mm	20	30
	< 250 mm	0	20
Risque faible : sols profonds sains ; limon argileux profond, limon franc, sols argileux profonds	> 400 mm	20	30
	250 à 400 mm	0	20
	< 250 mm	0	0